



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30.11.2024

EMSA-IS&T: IEA 4E EMSA Task «International Standards» and «Testing»



Quelle: 5.5 kW SiC-Frequenzumrichter auf dem BFH 10 kW Prüfstand © BFH, 2023



Berner
Fachhochschule

Datum: 30.11.2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Berner Fachhochschule
Departement Technik und Informatik
Labor für Elektrische Maschinen und Antriebssysteme
Quellgasse 21, CH-2501 Biel
www.ti.bfh.ch

Autoren:

Prof. Dr. Andrea Vezzini, Berner Fachhochschule, andrea.vezzini@bfh.ch
Thomas Lanz, Berner Fachhochschule, thomas.lanz@bfh.ch

BFE-Projektbegleitung:

Roland Brüniger, roland.brueniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer: SI/501851-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die zweite Phase des Round Robin Converter Tests hat gezeigt, dass das Uniform Testing Protocol (UTP) eine zuverlässige Prüfmethode für Umrichterverluste darstellt, die hochgradig wiederholbare Ergebnisse liefert. Die Messungen aus verschiedenen Laboren weltweit bestätigten eine hohe Übereinstimmung und trugen zur Beseitigung von Unklarheiten in der IEC 61800-9-2 Revision 2 bei.

Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung war, dass fast alle getesteten Umrichter in die höchste Effizienzklasse (IE2) fallen. Dies zeigt, dass bereits marktfähige Umrichter eine hohe Effizienz aufweisen, wodurch die Einführung weiterer Effizienzklassen möglicherweise nicht notwendig ist. Allerdings wurde festgestellt, dass die Korrekturfaktoren für Umrichter mit zusätzlichen Funktionen zu einer übermäßigen Kompensation von Verlusten führen können. Dies könnte dazu führen, dass ein Umrichter mit Ausgangsfilter in eine höhere Effizienzklasse eingestuft wird.

Die Ergebnisse bekräftigen die Notwendigkeit einer klaren Definition von Mindestanforderungen (MEPS) für Umrichter sowie einer verbesserten Transparenz bei Herstellerangaben zur Effizienz im Teillastbetrieb.

Die Untersuchung von Silizium-Karbid (SiC)-Wechselrichtern zeigt vielversprechende Effizienzsteigerungen durch höhere Schaltfrequenzen, jedoch nur bis zu einem bestimmten Punkt. Während die Reduzierung der Stromharmonischen Motorverluste verringert, dominieren bei zu hohen Schaltfrequenzen die Schaltverluste des Umrichters, sodass der Gesamtwirkungsgrad wieder sinkt.

Die Untersuchungen zu Teilentladungen (PD) haben bestätigt, dass SiC-Umrichter aufgrund steilerer Spannungsflanken höhere Überspannungen an Motoranschlüssen erzeugen können. Dies kann zu einer beschleunigten Alterung der Wicklungsisolation führen, insbesondere wenn bestehende Umrichter ohne Anpassungen ersetzt werden. Zudem wurde eine Erhöhung der Lagerströme beobachtet, wobei deren Auswirkungen stark vom Lagertyp und den Betriebsbedingungen abhängen.

Trotz der theoretischen Vorteile der SiC-Technologie ergaben die Langzeittests Probleme mit der Zuverlässigkeit der zur Verfügung stehenden Umrichter, was weitere Forschungsarbeiten zur Robustheit und industriellen Anwendbarkeit von Wide Bandgap (WBG)-Halbleitern rechtfertigt. Die Entwicklung einer umfassenden Forschungs-Roadmap stellt einen wichtigen Schritt dar, um offene Fragen zur Einführung und Optimierung von WBG-Technologien in industriellen Antrieben zu klären.

Résumé

La deuxième phase du test Round Robin Converter a démontré que l'Uniform Testing Protocol (UTP) est une méthode de test fiable pour les pertes des convertisseurs, qui fournit des résultats hautement répétables. Les mesures effectuées dans différents laboratoires du monde entier ont confirmé un haut degré de concordance et ont contribué à lever les ambiguïtés de la norme CEI 61800-9-2 Révision 2.

L'un des principaux résultats de l'étude est que presque tous les convertisseurs testés appartiennent à la classe d'efficacité la plus élevée (IE2). Cela montre que les convertisseurs déjà commercialisés présentent un rendement élevé, ce qui pourrait rendre inutile l'introduction de classes de rendement supplémentaires. Toutefois, il a été constaté que les facteurs de correction pour les convertisseurs dotés de fonctions supplémentaires peuvent entraîner une compensation excessive des pertes. Cela pourrait conduire à l'attribution d'une classe d'efficacité supérieure à un variateur équipé d'un filtre de sortie.

Les résultats confirment la nécessité de définir clairement les exigences minimales (MEPS) pour les convertisseurs et d'améliorer la transparence des déclarations des fabricants sur l'efficacité en charge partielle.

L'étude des onduleurs au carbure de silicium (SiC) montre des augmentations prometteuses de l'efficacité grâce à des fréquences de commutation plus élevées, mais seulement jusqu'à un certain point.



Alors que la réduction des harmoniques de courant diminue les pertes du moteur, les pertes de commutation du convertisseur dominent à des fréquences de commutation trop élevées, de sorte que le rendement global diminue à nouveau.

Les études sur les décharges partielles (DP) ont confirmé que les convertisseurs SiC peuvent générer des surtensions plus élevées aux bornes du moteur en raison des flancs de tension plus raides. Cela peut entraîner un vieillissement accéléré de l'isolation du bobinage, en particulier lorsque les convertisseurs existants sont remplacés sans adaptation. En outre, on a observé une augmentation des courants de palier, dont les effets dépendent fortement du type de palier et des conditions de fonctionnement.

Malgré les avantages théoriques de la technologie SiC, les tests à long terme ont révélé des problèmes de fiabilité des convertisseurs disponibles, ce qui justifie la poursuite des recherches sur la robustesse et l'applicabilité industrielle des semi-conducteurs à large bande interdite (WBG). Le développement d'une feuille de route de recherche complète représente une étape importante pour résoudre les questions en suspens concernant l'introduction et l'optimisation des technologies WBG dans les entraînements industriels.

Summary

The second phase of the Round Robin Converter Test has shown that the Uniform Testing Protocol (UTP) is a reliable test method for converter losses that provides highly repeatable results. The measurements from various laboratories around the world confirmed a high level of agreement and contributed to the elimination of ambiguities in IEC 61800-9-2 Revision 2.

A key result of the study was that almost all the inverters tested fell into the highest efficiency class (IE2). This shows that marketable inverters already have a high level of efficiency, which means that the introduction of further efficiency classes may not be necessary. However, it was found that the correction factors for inverters with additional functions can lead to excessive compensation of losses. This could lead to an inverter with an output filter being classified in a higher efficiency class.

The results confirm the need for a clear definition of minimum requirements (MEPS) for inverters and for improved transparency in manufacturer information on efficiency in partial load operation.

The investigation of silicon carbide (SiC) inverters shows promising increases in efficiency through higher switching frequencies, but only up to a certain point. While the reduction of the current harmonics reduces motor losses, the switching losses of the inverter dominate if the switching frequencies are too high, so that the overall efficiency drops again.

The investigations into partial discharge effects on the windings (PD) have confirmed that SiC inverters can generate higher overvoltages at motor connections due to steeper voltage edges. This can lead to accelerated ageing of the winding insulation, especially if existing inverters are replaced without adjustments. An increase in bearing currents has also been observed, although the effects of this depend heavily on the bearing type and operating conditions.

Despite the theoretical advantages of SiC technology, the long-term tests revealed problems with the reliability of the available converters, which justifies further research into the robustness and industrial applicability of wide bandgap (WBG) semiconductors. The development of a comprehensive research roadmap represents an important step towards clarifying open questions regarding the introduction and optimization of WBG technologies in industrial drives.



Take-home messages

- Das Uniform Testing Protocol (UTP) der RR'C hat sich als wertvolle Prüfmethode erwiesen, die in hohem Masse wiederholbare Ergebnisse von Verlustmessungen von Umrichtern in verschiedenen Labors liefert. Die Arbeitsgruppe IEC SC22G/WG18 hat daraufhin die vorgeschlagenen Änderungen zur Beseitigung der Unklarheiten bei der Prüfung in die zweite Revision der IEC 61800-9-2 aufgenommen.
- Die gemessenen Verluste der Umrichter lagen alle unter 30 bis 50 % der Referenzverluste von IE1 und damit deutlich unter der Spanne für die höchste IE-Klasse für Umrichter (IE2). Daher fallen fast alle auf dem Markt befindlichen Umrichter in diese IE-Klassifizierung. Obwohl sich die absoluten Verluste bei gleichem Nennausgangstrom um bis zu einem Faktor zwei unterscheiden können, ist kein Unterschied in der IE-Klasse möglich.
- Die eingeführten Korrekturfaktoren für Umrichter-Module mit zusätzlicher Funktionalität neigen dazu, die zusätzlichen Verluste zu stark zu kompensieren. Im Extremfall kann dies dazu führen, dass ein Umrichter mit einem Stromausgangsfilter von der Effizienzklasse IE1 auf IE2 hochgestuft wird
- Die Testergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen den Herstellerangaben und den gemessenen Werten der Input-Output-Methode. Da viele Hersteller ihre Daten auf Berechnungen statt auf Messungen stützen, ist diese Übereinstimmung ein positives Indiz für die Verlässlichkeit der angegebenen Werte. Allerdings bleiben die Annahmen und Parameter, auf denen diese Berechnungen basieren, meist undokumentiert, sodass eine unabhängige Überprüfung oder Neuberechnung nicht möglich ist. Die Norm IEC 61800-9-2 bietet lediglich eine Vorlage für ein Berechnungsmodell mit einigen Standardparametern.
- Silizium-Karbid-Wechselrichter können den Gesamtwirkungsgrad durch höhere Schaltgeschwindigkeiten und damit geringere Motorverluste erhöhen. Dazu ist es jedoch notwendig, die Schaltfrequenz auf den Motor abzustimmen. Zu hohe Schaltfrequenzen führen zu einer Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades.
- Die schnellen Anstiegszeiten von SiC-Umrichtern führen zu Überspannungen am Motor. Dies ist insbesondere beim Austausch von Frequenzumrichtern an älteren Motoren zu beachten, deren Isolationssystem dafür nicht ausgelegt ist. Eine Erhöhung der Lagerströme konnte ebenfalls festgestellt werden, ob diese jedoch schädlich sind, hängt stark von den verwendeten Lagern und der Einsatztemperatur ab. Eine generelle Aussage ist nicht möglich.



Inhaltsverzeichnis

Take-home messages	5
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Struktur des vorliegenden Berichts	9
2 International Standards	10
2.1 Motivation des Projektes	10
2.2 Projektziele	10
2.3 Vorgehen und Methode	10
2.4 Durchgeführte Arbeiten	11
2.5 Schlussfolgerungen	12
3 Round Robin Converter Phase 2	13
3.1 Motivation des Projektes	13
3.2 Projektziele	13
3.3 Anlagenbeschrieb	14
3.4 Vorgehen und Methode	14
3.5 Durchgeführte Arbeiten	15
3.6 Schlussfolgerungen	16
4 SiC-Wechselrichter für industrielle Antriebe	17
4.1 Motivation des Projektes	17
4.2 Projektziele «Testing»	18
4.3 Anlagenbeschrieb	18
4.4 Vorgehen und Methode	20
4.5 Durchgeführte Arbeiten	21
4.6 Ergebnisse SiC-Wechselrichter Testreihe	26
4.7 Systemtests	26
4.8 Grundlagen Teilentladungstests	27
4.9 Lagerströme	38
4.10 Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap 2024-2027	48
4.11 Schlussfolgerungen	51
4.12 Ausblick und zukünftige Umsetzung	51
5 Nationale und internationale Zusammenarbeit	52
5.1 Nationale Zusammenarbeit	52
5.2 Internationale Zusammenarbeit	52
6 Kommunikation	55
7 Publikationen	56
8 Literaturverzeichnis	57
9 Anhang	59



Abkürzungsverzeichnis

ACEE	Advisory Committee on Energy Efficiency
BFE	Bundesamt für Energie
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
EMSA	Electric Motor Systems Annex
FU	Frequenzumrichter
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
MEPS	Minimum Efficiency Performance Standards
NC	National Committee
PD	Partial Discharge (Teilentladung)
PDIV	Partial Discharge Inception Voltage (Teilentladungs-Auftretensspannung)
RPDIV	Repetitive Partial Discharge Inception Voltage
RR'C	Round Robin Converter
SC	IEC Technical Subcommittees
SiC	Silicon-Carbide
TC	Technical Committee
TCP	IEA Technology Collaboration Programmes
TE	Teilentladung
TL IS	Team Leader International Standards
VFD	Variable Frequency Drives
WG	Working Group



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Im Rahmen des IEA 4E Electric Motor System Annex übernimmt die Schweiz mit der Person von Andrea Vezzini die Co-Leitung der beiden Arbeitspakete resp. Tasks «International Standards» und «Testing». Diese beiden Tasks stellen eigentliche Schwerpunkte innerhalb des Annexes Electric Motor Systems dar.

1.1.1 Task 1: «International Standards» (Task Leader: Sandie B. Nielsen, Dänemark; Task Co-Leader: Andrea Vezzini, Schweiz)

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) entwickelt mehrere internationale Normen für die Prüfung und Klassifizierung der Effizienz von:

- Elektromotoren
- Motoren, die von Frequenzumrichtern (VFD) gespeist werden.
- Frequenzumrichtern (VFD) Motor- und Frequenzumrichter-Kombinationen.

Die Task-Member <International Standards> (IS) partizipieren in den technischen Gremien der IEC und der ISO für die Ausarbeitung internationaler Normen für die Prüfung und Klassifizierung der Effizienz von elektrischen Maschinen, Frequenzumrichtern und Anwendungen mit elektrischen Antriebssystemen (Power Drive Systems).

Die Task-Member IS haben die folgenden Hauptaufgaben:

- legen die Prioritäten für die Teilnahme an Arbeitsgruppen und Standardprojekten fest,
- koordinieren den Informationsfluss von den jeweiligen TCs und NCs zu EMSA und zurück,
- koordinieren die Stellungnahmen zu Normentwürfen,
- initiieren die Aufnahme der Normen in die nationale Politik (MEPS, Labels usw.).
- erhalten und verteilen das jeweilige IS-Budget aus EMSA-Mitteln (und etwaige zusätzliche nationale Beiträge interessierter Länder).

Die Arbeit des Task IS konzentriert sich derzeit auf diese technischen IEC-Ausschüsse, welche sich mit Prüfverfahren und Energieeffizienzklassifizierung für netzgekoppelte und umrichtergespeiste Motoren kümmern:

- IEC TC2 Rotierende Maschinen WG 12, «Rating, performance, Mechanical Ix Configurations and general support»
- IEC TC2 Rotierende Maschinen WG 28, «Performance as determined by tests»
- IEC TC2 Rotierende Maschinen WG 31: «Efficiency classes».
- IEC SC22G Umrichter WG18: «Adjustable speed electric power drive systems (PDS)».

Konsequenterweise erfolgte in den Berichtsjahren zum Zwecke der Dissemination jeweils auch eine Teilnahme in den Europäischen (CEN/CENELEC TC22X) und nationalen Gremien (TK2 und TK22).

Neu ist seit dem Jahre 2022 die Zusammenarbeit mit dem übergreifenden Beratungsgremium ACEE zustande gekommen (Wahl von Andrea Vezzini in das ACEE erfolgte am 21.06.2022)



1.1.2 Task 2: «Testing» (Task Leader: Sandie B. Nielsen, Dänemark; Task Co-Leader: Andrea Vezzini, Schweiz)

Die zweite Aufgabe konzentriert sich auf die Prüfung von Motoren und Umrichtern und ist in zwei Arbeitspakete aufgeteilt.

Das erste Arbeitspaket, «**Round Robin Converter Phase 2**», vom 29. März 2019 bis 31. März 2021 basiert auf dem im Oktober 2018 abgeschlossenen Pilot-Ringversuch von Industrieumrichtern, welcher im Dokument «Report of Results of Phase 1» dokumentiert wurde. Die Aktivitäten im Round Robin umfassen die Organisation, Überwachung und Dokumentation des Prüfprogramms für Umrichterverluste (RR'C), Phase 2. Der entsprechende Bericht erschien Ende 2022 [Anhang 2]

Im Rahmen der Überarbeitung der IEC 61800-9-2:2017 und der Veröffentlichung einer kommenden Ausgabe 2 müssen mehrere Fragen zu Umrichterverlusten geklärt werden. Die Prüfmethode selbst hat sich als nicht eindeutig erwiesen, ebenso wie die Referenzverluste, die vor fünf Jahren auf der Grundlage eines Simulationsmodells definiert wurden, das schliesslich in einer CENELEC-Norm EN 50598-2:2015 erschien. Diese Werte wurden seither nie wieder durch aktuelle Tests von Marktprodukten verschiedener Hersteller bestätigt. Die aktuelle Testmethode wurde nie ausführlich genug beschrieben oder von unabhängigen Testlabors verifiziert.

Das zweite Arbeitspaket, die «**SiC-Wechselrichter für industrielle Antriebe**», vom März 2021 bis 30. April 2024 untersucht die Auswirkung der hohen Schaltgeschwindigkeiten von Silizium-Karbid Umrichter auf das Alterungsverhalten von Wicklungen elektrischer Maschinen.

Die mit den SiC-Bauteilen verbundenen ultraschnellen Spannungsflanken (dV/dt) setzen das elektrische Isolationssystem (EIS) und die Lager des Motors starken elektrischen Belastungen aus. Diese erhöhte Belastung führt zu einer beschleunigten Alterung und damit zu einem vorzeitigen Ausfall des Isolationssystems bzw. zu Schäden in den Lagern der Motoren. Mit Hilfe der Messung von Teilentladungen (TE) in elektrischen Maschinenwicklungen soll der Isolationszustand überwacht werden. Auch ein entsprechendes Konzept zur Detektion von Lagerschäden soll ausgearbeitet und umgesetzt werden.

Die Einführung von Wide-Bandgap-Halbleitern (SiC und GaN) in der Industrie steht trotz ihrer zahlreichen Vorteile vor mehreren Herausforderungen und Kritikpunkten. Einige der am häufigsten genannte Argumente, die gegen ihren weit verbreiteten Einsatz sprechen, sind Kosten und Zuverlässigkeit, Komplexität und Risiko für Anlagen. In Zusammenarbeit mit anderen Forschungsgruppen der Schweiz und einigen internationalen Partnern ist ein Konzept für eine Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap 2024-2027 entstanden an deren Ende ein «**White Book**» entstehen soll

1.2 Struktur des vorliegenden Berichts

Für die bessere Lesbarkeit des Berichts ist dieser in drei separate Kapitel aufgeteilt:

- 2. International Standards (Task 1: “International Standards”)
- 3. Round Robin Converter Phase 2 (Arbeitspaket 1 für Task 2: «Testing»)
- 4. SiC-Wechselrichter für industrielle Antriebe (Arbeitspaket 2 für Task 2: «Testing»)

In den drei Abschnitten werden Motivation, Aktivitäten und Schlussfolgerungen einzeln aufgeführt.



2 International Standards

2.1 Motivation des Projektes

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) entwickelt Normen zur Prüfung und Effizienzklassifizierung elektrischer Maschinen und Umrichter. Die Schweiz engagiert sich insbesondere in den relevanten Arbeitsgruppen, um sicherzustellen, dass die Normen praxistauglich und wissenschaftlich fundiert sind. Seit 2022 besteht zudem eine Zusammenarbeit mit dem IEC Advisory Committee on Energy Efficiency (ACEE).

Die Arbeit des Task IS konzentriert sich derzeit auf diese technischen IEC-Ausschüsse, welche sich mit Prüfverfahren und Energieeffizienzklassifizierung für netzgekoppelte und umrichtergespeiste Motoren kümmern.

2.2 Projektziele

Die aktive Teilnahme an IEC und ISO umfasst die folgenden Aufgaben (alle TC- und WG-Dokumente sind IEC/ISO-vertraulich. Das bedeutet, dass der TL-IS Informationen sorgfältig sammeln und innerhalb der EMSA verteilen muss):

- Berichterstattung an die EMSA-Mitglieder über die Aktivitäten der IEC- (Motoren, Umrichter) und ISO-Arbeitsgruppen (Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren) und Identifizierung von Bereichen für mögliche zukünftige von der EMSA finanzierte Prüf- und Forschungsaktivitäten.
- Rückmeldung an die EMSA-Mitglieder über die Interaktion zwischen ISO (z.B. Ventilatoren) und IEC (z.B. Motoren und VFDs für Ventilatoren) bei der Arbeit an motorgetriebenen Einheiten.

2.3 Vorgehen und Methode

Das Arbeitspaket «International Standards» umfasst folgende Aktivitäten

- Besuch der Meetings der folgenden internationalen Technischen Arbeitsgruppen der IEC:TC2 WG12, WG18, WG31, CENELEC TC22X und von TC22 SC22G WG18
- Besuch der nationalen Meetings von TC2 und TC22
- Besuch der ACEE-Meetings
- Erstellen von Meeting-Protokollen zuhanden den EMSA-Mitgliedern und Präsentieren der Resultate an den EMSA-Meetings



2.4 Durchgeführte Arbeiten

Im Task «Internationale Standards» wurden im Rahmen zahlreicher IEC-Meetings an folgenden Normentwürfen mitgearbeitet:

1. PNW 2-2156 ED1, Specific test methods for determining losses and efficiency of water submersible motors (WG28)
-> Stage PNW in 09/2023
2. IEC 60034-1 ED15, Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance (WG12)
-> Stage CD in 11/2023
3. IEC 60034-2-1 ED3, Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (WG28)
-> Stage CFDIS in 10/2023
4. IEC 60034-2-2 ED2, Rotating electrical machines - Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests - Supplement to IEC 60034-2-1. (WG12)
-> Stage CFDIS in 10/2023
5. IEC 60034-2-3 ED2, Rotating electrical machines - Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors (WG28).
-> Stage CFDIS in 10/2023
6. IEC 60034-12 ED4, Rotating electrical machines - Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors (WG12)
-> Stage AFDIS in 08/2023
7. IEC 60034-30-3 ED1, Rotating electrical machines - Part 30-3: Efficiency classes of high voltage AC motors (IE code) (WG31)
-> Stage RPUB in 11/2023
8. IEC 60034-35 ED1, Rotating electrical machines - Part 35: Technical requirements for electrical sheet metal and strip metal used in electrical machines (WG31)
-> Stage PCC in 10/2023
9. IEC 60072-2 ED2, Dimensions and output series for rotating electrical machines - Part 2: Frame numbers 355 to 1000 and flange numbers 1180 to 2360 (WG31)
-> Stage ACD in 10/2023
10. IEC 61800-9-1: Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-1: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications - General requirements for setting energy efficiency standards for power driven equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM) (WG18).
-> Stage ACDV in 11/2023
11. Adjustable speed electrical power drive systems (PDS) - Part 9-2: Ecodesign for motor systems - Energy efficiency determination and classification
-> Published 11/2023



Seit Juni 2022 nimmt A. Vezzini zudem an den Sitzungen der ACEE teil.

Das ACEE befasst sich mit Fragen der Energieeffizienz, die nicht spezifisch für einen einzelnen technischen Ausschuss der IEC sind. Er koordiniert die Aktivitäten im Bereich der Energieeffizienz. ACEE ist verantwortlich für die Zuordnung von horizontalen Energieeffizienzaspekten und -anforderungen.

Das ACEE bietet Leitlinien für die Umsetzung in einer allgemeinen Perspektive und für bestimmte Sektoren. Es fördert eine Systemperspektive für die Entwicklung von Normen für Energieeffizienz und bietet Unterstützung für Systemüberlegungen.

Im Rahmen der Mitarbeit im ACEE wurde an folgenden Dokumenten gearbeitet:

1. IEC GUIDE 118:2017, Edition 1.0 (2017-03-28), Inclusion of energy efficiency aspects in electrotechnical publications
2. IEC GUIDE 119:2017, Edition 1.0 (2017-03-28), Preparation of energy efficiency publications and the use of basic energy efficiency publications and group energy efficiency publications

2.5 Schlussfolgerungen

Die Mitarbeit in den internationalen Normengremien bildet ein wichtiges Bindeglied zwischen Regulator und Industrie. Die aktive Kollaboration bei den Normen zur Bestimmung der Effizienzklassen von Industriemotoren führte zu verständlichen und mit hoher Genauigkeit wiederholbaren Testvorschriften. Dies erhöht das Vertrauen in diese Massnahme zur Verbreitung von effizienteren Motorenklassen weltweit.

Das Labor für Elektrische Maschinen und Antriebssysteme der Berner Fachhochschule kann durch den Einsatz in die verschiedenen technischen Gremien sein Angebot im Bereich «Testing» für industrielle Antriebe in den Punkten Normentreue, Messverfahren und -genauigkeit und Kosten entscheiden ausbauen. Somit entsteht an der Hochschule ein Angebot für die Schweizer Industriepartner, welches bis zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar war. Die Berner Fachhochschule baut zu diesem Zweck ihre Infrastruktur aus eigenen Mittel entsprechend weiter aus.



3 Round Robin Converter Phase 2

3.1 Motivation des Projektes

Im Rahmen der Überarbeitung der IEC 61800-9-2:2017 und der Veröffentlichung einer kommenden Ausgabe 2 müssen mehrere Fragen zu Umrichterverlusten geklärt werden. Die Prüfmethode selbst hat sich als nicht eindeutig erwiesen, ebenso wie die Referenzverluste, die vor fünf Jahren auf der Grundlage eines Simulationsmodells definiert wurden, das schliesslich in einer CENELEC-Norm EN 50598-2:2015 erschien. Diese Werte wurden seither nie wieder durch aktuelle Tests von Marktprodukten verschiedener Hersteller bestätigt. Die aktuelle Testmethode wurde nie ausführlich genug beschrieben oder von unabhängigen Testlabors verifiziert.

Um eine zuverlässige Prüfmethode für Umrichterverluste auszuarbeiten und um die aktuell definierten Referenzverluste und Effizienzklassen zu überprüfen, hat EMSA in Zusammenarbeit mit der IEC einen internationalen Ringversuch für Umrichterverluste (Round Robin Converter RR'C) gestartet. EMSA fungiert als Organisator, und einige EMSA-Mitgliedsländer beteiligen sich aktiv an der Finanzierung unabhängiger Prüflaboratorien in Australien, Dänemark, der Schweiz und den USA.

Damit sollen die wissenschaftlichen Grundlagen für die Etablierung sowohl einer gesicherten Prüfmethode als auch der notwendigen Datenbank für Wechselrichterverluste über den gesamten Leistungsbereich von 0,12 kW bis 1000 kW geschaffen werden.

Die IEC SC22G WG18 wird entscheidend dazu beitragen, die neuen Erkenntnisse für die geplante Revision der IEC 61800-9-2, Ausgabe 2¹ zu sammeln und zu integrieren.

Der Ringversuch war geplant von März 2019 bis Oktober 2020. Aus verschiedenen Gründen hat sich die Fertigstellung des Berichts allerdings bis Ende Q1/2022 verschoben.

3.2 Projektziele

Die Hauptziele des internationalen Round Robin Tests (RR'C) für Umrichter sind:

1. Das in der IEC 61800-9-2:2017 (Ausgabe 1) beschriebene Prüfverfahren für Umrichter (und in der IEC TS 60034-2-3:2013 für umrichtergespeiste Motoren) wurde nicht ausreichend lange angewendet, um deren Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu kennen. Diese sollen verifiziert werden.
2. Die Testlabors auf der ganzen Welt, die diese Testmethode anwenden, sind damit noch nicht vertraut. Es soll ein Vergleich der Laborleistungen anhand gleicher Messungen erfolgen.
3. Die Leistung der Konverter und ihre Verluste müssen anhand der Katalogdaten überprüft werden. Damit kann ein wissenschaftlich fundierter und dokumentierter Nachweis erstellt werden.
4. Verschiedene Produkte verschiedener Hersteller müssen hinsichtlich der Referenzverluste und der Klassifizierung (IE1/IE2) überprüft werden, um eventuell höhere Effizienzklassen definieren zu können. Dazu soll die Verteilung der Resultate verschiedener Hersteller dokumentiert werden.
5. Die Ergebnisse des Round Robin-Tests werden wichtige Erkenntnisse für die Überarbeitung der IEC 61800-9-2 ed. 2 liefern, insbesondere für die Gestaltung eines aktualisierten und soliden Prüfverfahrens, das in der aktuellen Version oft als vage und unklar bezeichnet wird.

¹ IEC 61800-9-2 Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2, Ausgabe 2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications - Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters



6. Die Bereitstellung ausreichender solider und unparteiischer gemessener Hintergrunddaten für eine mögliche Korrektur des aktuellen Niveaus der Referenzwerte für Verluste innerhalb von Umrichtern sind ein weiteres wichtiges Ziel des Ringversuchs.

3.3 Anlagenbeschrieb

Damit die Berner Fachhochschule im Ringversuch teilnehmen kann, hat Sie ihre Kapazitäten für die Prüfung von elektrischen Maschinen weiter ausgebaut. Neben dem im Pilotprojekt verwendeten 11 kW Prüfstand verfügt die BFH nun über zwei weitere Prüfstände mit Leistungen von 40 kW und 90 kW. Im Ringversuch wird die BFH die Wechselrichter mit einer Leistung bis 37 kW testen.

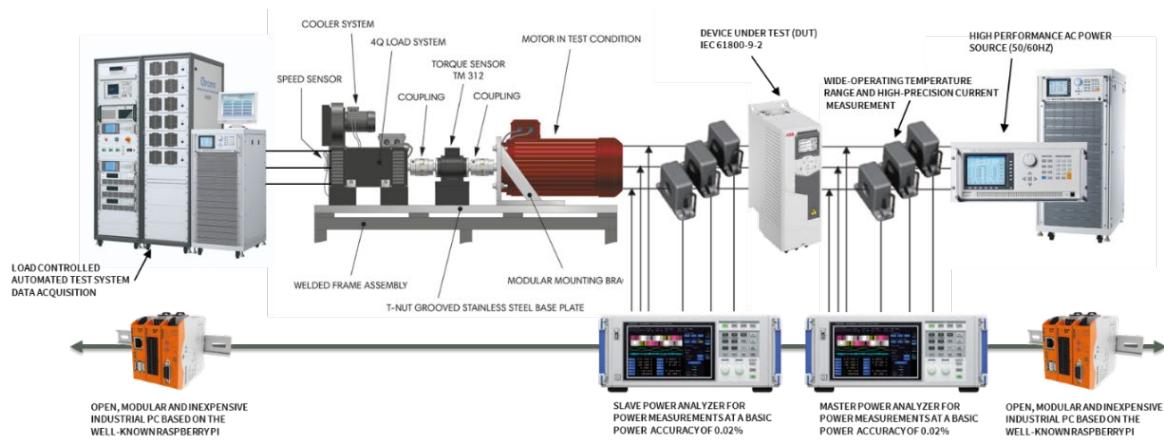


Abbildung 1: Automatisierter Effizienzprüfstand. Neben den herkömmlichen Motortests mit Prüfling, Lastmaschine und Drehmomentmessung erfordert die Norm-Effizienzprüfung eine hochwertige Stromquelle, ein Wicklungsohmmeter, einen Leistungsanalysator und ein Testautomatisierungssystem.

3.4 Vorgehen und Methode

Für Task 2: «Testing Round Robin Converter»

1. Die Planung und Kontrolle des gesamten Ringversuches erfolgen in Zusammenarbeit mit Sandie Nielsen. Dazu werden moderne Gruppenkollaborationstools verwendet und die Daten werden möglichst in standardisierter Form gesammelt und anschliessend mit statistischen Methoden ausgewertet.
2. Alle Umrichter werden in jedem Labor mit Motoren getestet, die der Leistungsklasse des Umrichters entsprechen. In jeder Prüfsequenz werden Umrichter und Motor durch eine definierte Reihe von Betriebspunkten geführt, wobei der Motor im Voll und Teillastbereich (Drehmoment und Drehzahl) läuft. Ein- und Ausgang des Umrichters werden mit hochpräzisen Leistungsmessgeräten gemessen.
3. Die Ein-/Ausgangsverluste werden aufgezeichnet, der Umrichterwirkungsgrad berechnet und in einem Standardberichtsformat protokolliert, das für die gesamte statistische Analyse verwendet wird.
4. Nach den Tests werden die Konverter an das nächste Labor geliefert.
5. Die Resultate werden ausgewertet und sowohl an den IEC- als auch an den EMSA-Meetings präsentiert.



3.5 Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Task «Testing» wurde der Bericht des Round Robin Converter Phase 2 Ende 2022 publiziert und auf die Webseite der [EMSA](#) gestellt (11.12.2022).

Im Nachgang der Veröffentlichung wurde der Bericht von verschiedenen Seiten kommentiert und im Allgemeinen positiv aufgenommen. In Diskussionen mit Vertretern der Industrie zeigte sich eine hohe Akzeptanz insbesondere bezüglich der Messergebnisse. Es wurde mit Zufriedenheit auf die Genaugigkeit und Wiederholbarkeit des neu entwickelten Messverfahrens reagiert. Die Messungen wurden allerdings nicht als Bestätigung für die Notwendigkeit einer neuen IE-Effizienzklasse für Umrichter bewertet. Die Konsequenz dieser Haltung war, dass der neu revidierte IEC-Standard IEC 61800-9-2 in seiner Revision 2 keine neuen IE-Effizienzklassen erhalten hat.

3.5.1 Policy Brief

In Zusammenarbeit mit Rita Wehrle wurde eine zweiseitige Zusammenfassung des Berichts zum Round Robin Converter erstellt mit Empfehlungen für die Gesetzgeber.

Die Zusammenfassung wurde nach der Veröffentlichung durch die Industrie zum Teil kritisiert und wurde im Nachgang noch einmal geschärft.

Unter dem Titel «Fast alle auf dem Markt befindlichen FUs erreichen IE2» wurde schlussendlich folgender Text am 26. Juli 2023 veröffentlicht:

«Die Norm definiert zwei Effizienzklassen für Umrichter: IE1 und IE2. Alle gemessenen Frequenzumrichter (FU) erfüllten die IE2-Klasse. Die absoluten Verluste von FUs sind im Vergleich zu den Verlusten von Elektromotoren wesentlich geringer, wobei der durchschnittliche Wirkungsgrad von FUs bei 97,5 % liegt.

Alle getesteten FU wiesen bei Nennlast einen Wirkungsgrad zwischen 96 % und 98 % auf. Die Verluste aller FU liegen im gleichen IE-Index-Bereich (IE-Index von 0,2-0,6) und deutlich unter dem Schwellenwert für IE2 (IE-Index 0,75), siehe Abbildung 1.

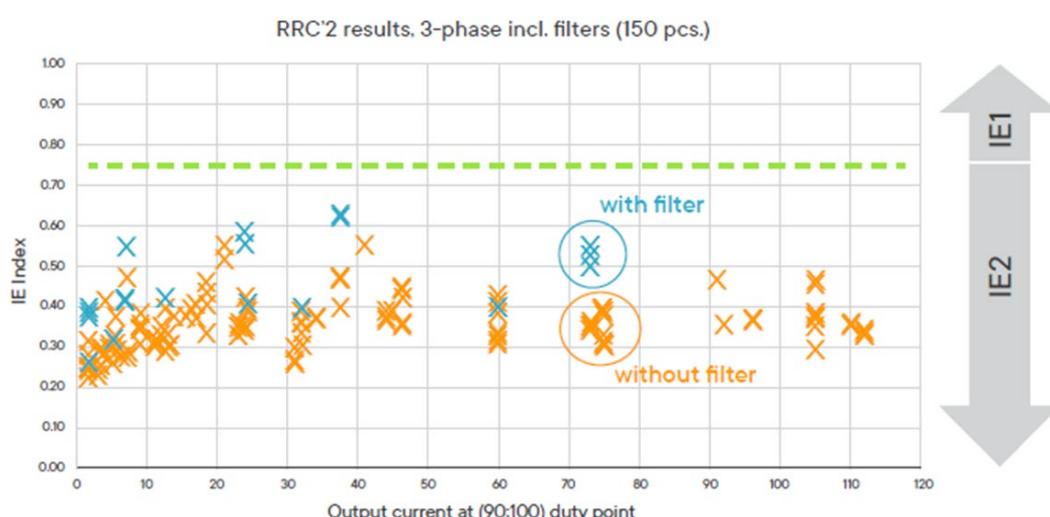


Abbildung 1: IE-Index für 3-phägige Grundantriebsmodule (CDM) über dem Nennausgangsstrom bei (90:100) Betriebspunkt. Die gestrichelte Linie ist der Schwellenwert zwischen IE2 (unterhalb der Linie) und IE1 (oberhalb der Linie). Orange Kreuze: ohne Filter, blaue Kreuze: mit Filter. Hinweis: Die Wirkungsgradklassen beziehen sich auf die Verluste des geprüften FUs und die Verluste eines Referenz-FUs; der IE-Indexwert wird berechnet, indem die Verluste des geprüften FUs durch einen Referenz-FU geteilt werden.



Die Einführung zusätzlicher IE-Klassen könnte eine weitere Differenzierung ermöglichen, bringt aber möglicherweise keinen nennenswerten zusätzlichen Nutzen in Form von Energieeinsparungen. Die vorteilhaftesten politischen Optionen sind die Einführung von MEPS für FUs, da sie die leistungsschwächeren FUs vom Markt ausschliessen, und die Einführung von Informationspflichten für Teillastbetriebspunkte (ähnlich der aktuellen europäischen MEPS) fordern, welche die Berechnung der Effizienz bei Teillast ermöglichen würde. Diese Massnahmen könnten mit anderen Massnahmen kombiniert werden, die die Verbesserung der Effizienz auf Systemebene fördern.

Die Round-Robin-Runde hat gezeigt, dass die Korrekturfaktoren, die für FUs mit geänderter Funktionalität eingeführt wurden, dazu neigen, die zusätzlichen Verluste leicht zu übercompensieren, was im Extremfall bedeuten könnte, dass ein IE1-FU durch Hinzufügen eines Filters zu einem IE2 'aufgerüstet' werden könnte. Dies könnte durch eine Überarbeitung der Korrekturfaktoren in der Norm behoben werden.»

Der Policy Brief ist auf der Webseite der EMSA zum [Download](#) bereit.

3.6 Schlussfolgerungen

- Das Uniform Testing Protocol (UTP) der RR'C hat sich als wertvolle Prüfmethode erwiesen, die in hohem Masse wiederholbare Ergebnisse von Verlustmessungen von Umrichtern in verschiedenen Labors liefert. Die Arbeitsgruppe IEC SC22G/WG18 hat daraufhin die vorgeschlagenen Änderungen zur Beseitigung der Unklarheiten bei der Prüfung in die zweite Revision der IEC 61800-9-2 aufgenommen.
- Die gemessenen Verluste der Umrichter lagen alle unter 30 bis 50 % der Referenzverluste von IE1 und damit deutlich unter der Spanne für die höchste IE-Klasse für Umrichter (IE2). Daher fallen fast alle auf dem Markt befindlichen Umrichter in diese IE-Klassifizierung. Obwohl sich die absoluten Verluste bei gleichem Nennausgangstrom um bis zu einem Faktor zwei unterscheiden können, ist kein Unterschied in der IE-Klasse möglich.



4 SiC-Wechselrichter für industrielle Antriebe

4.1 Motivation des Projektes

4.1.1 Teilprojekt SiC-Wechselrichter Testreihe

Der Silizium-Karbid (SiC) Umrichter bietet einen höheren Wirkungsgrad als ein Umrichter mit Silizium, was vor allem auf die deutlich geringeren Energieverluste und geringere Umkehrladung (Reverse Recovery Charge) zurückzuführen ist. Dies führt zu einer höheren Schaltleistung und einem geringeren Energiebedarf in der Einschalt- und Ausschaltphase. Geringere Wärmeverluste ermöglichen auch den Verzicht auf Kühlssysteme, wodurch sich Platz, Gewicht und Infrastrukturkosten verringern.

Die Erhöhung der Schaltfrequenz der Halbleiter wiederum führt zu geringeren Oberschwingungen im Motorstrom und damit zu einer Verringerung der höheren Oberschwingungsverluste in den elektrischen Maschinen.

Die mit den SiC-Bauelementen verbundenen ultraschnellen Spannungsflanken (dV/dt) setzen das elektrische Isolationssystem (EIS) des Motors starken elektrischen Spannungen aus. Diese erhöhte Belastung führt zu einer beschleunigten Alterung und damit zu einem vorzeitigen Ausfall des Isolationssystems.

Messungen von Teilentladungen (TE) in elektrischen Maschinenwicklungen können normalerweise zur Überwachung des Isolationszustands verwendet werden. Es wurde experimentell festgestellt, dass die Steilheit der Spannungsflanke einen grossen Einfluss auf das Isolationssystem hat.

Pulsweitenmodulierte (PWM) Umrichter sind eine der Hauptursachen für Motorlagerausfälle in umrichtergespeisten Motorantriebssystemen. Insbesondere erzeugen alle Umrichter Gleichtaktspannungen im Verhältnis zur Erde. Diese Spannungen sorgen für Kopplungs- oder Lagerströme durch parasitäre Motorkapazitäten zum Rotoreisen, die über die Lager zum geerdeten Statorgehäuse fliessen. Ein Stromfluss im Lager kann zur Zersetzung des Schmierfettes oder lokalem Aufschmelzen der Lauffläche führen.

4.1.2 Teilprojekt Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap

Umrichter mit Halbleiter mit breiter Bandlücke (Wide-Bandgap, z.B. SiC und GaN) bieten im Vergleich zu herkömmlichen Silizium-Halbleiter-Umrichtern einen deutlich höheren Wirkungsgrad. Dieser Wirkungsgrad ist in erster Linie auf die wesentlich geringeren Energieverluste und die reduzierte Rückstromladung während der Einschalt- und Ausschaltphase zurückzuführen. Darüber hinaus ermöglicht der geringere Wärmeverlust von WBG-Halbleitern die Verkleinerung von Kühlssystemen, was wiederum den Platzbedarf, das Gewicht und die Infrastrukturkosten von WBG-basierten industriellen Wechselrichtern reduziert.

Darüber hinaus führt die Möglichkeit, die Schaltfrequenz von Umrichtern zu erhöhen, zu einer Verringerung der Oberschwingungen im Motorstrom. Diese Verringerung der Oberschwingungen minimiert die Oberschwingungsverluste in elektrischen Maschinen und verbessert so die Gesamtleistung und Effizienz des Systems. Die verbesserte thermische Leistung und die elektrischen Eigenschaften der WBG-Halbleiter tragen möglicherweise auch zu einer längeren Lebensdauer der Geräte und einer höheren Zuverlässigkeit bei, was sie zu einer attraktiven Option für industrielle Antriebsanwendungen macht. Insbesondere die längere Lebensdauer trägt zumindest teilweise zum Thema Nachhaltigkeit und sogar teilweise zum Aspekt der Kreislaufwirtschaft (Schlüsselprinzip: Produkte und Materialien in Gebrauch zu halten) bei.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von Wide-Bandgap-Halbleitern in industriellen Antrieben eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt, darunter ein höherer Wirkungsgrad, geringere Kühlungsanforderungen, kleinere Formfaktoren und eine höhere Systemzuverlässigkeit. Diese Vorteile



tragen gemeinsam zu niedrigeren Betriebskosten und höherer Leistung bei und machen WBG-Halbleiter zu einer überzeugenden Wahl für moderne industrielle Anwendungen.

4.2 Projektziele «Testing»

4.2.1 Projektziele des Teil-Projektes SiC-Wechselrichter Testreihe

Drei Ergebnisse werden von den SiC-Wechselrichter Testreihen erwartet:

1. Schaffung einer Ausgangsbasis für den Vergleich mehrerer wichtiger Leistungsparameter für den Wechselrichter (CDM) und das gesamte strombetriebene System (PDS). Wenn möglich, sollten die Tests gemäss den Normen durchgeführt werden. Ziel ist es festzustellen, ob sich SiC-Wechselrichter mit den heutigen Normen und Geräten ausreichend genau messen lassen.
2. Auf der Grundlage der Ergebnisse einer Literaturstudie wird ein Testprogramm entwickelt, um die Auswirkungen des SiC-Wechselrichters auf die Alterung des elektrischen Isolationssystems (EIS) zu bestimmen. Höchstwahrscheinlich werden mindestens 2 Testsysteme aufgebaut (SiC-basiert und Si-basiert, vorzugsweise wird auch ein 3L-Setup einbezogen). Teilentladungen (TE) sind ein Symptom und manchmal auch eine Ursache für viele Arten von Verschlechterungsmechanismen der Isolierung von Motor- und Generator-Statorwicklungen. Es wird untersucht, ob eine Online-Messung der TE möglich ist, andernfalls werden regelmässige Prüfintervalle eingeplant.
3. Als Option wird versucht zu untersuchen, ob derselbe Prüfaufbau zur Messung von Motorlagerausfällen (oder konkreter: der Motorlagerströme) verwendet werden kann.

4.2.2 Projektziele des Teil-Projekts WBG-Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap

Zwei Ergebnisse werden von den Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap erwartet:

1. Die Einführung von Wide-Bandgap-Halbleitern (SiC und GaN) in der Industrie steht trotz ihrer zahlreichen Vorteile vor mehreren Herausforderungen und Kritikpunkten. Einige der am häufigsten genannte Argumente, die gegen ihren weit verbreiteten Einsatz sprechen, sollen erläutert und auf Ihre Berechtigung überprüft werden
2. Es sollen Forschungsfragen formuliert werden, die es erlauben, die Bedenken der Industrie zu widerlegen und damit eine schnellere Adoption der Wide-Bandgap-Power Semiconductors in Industriemotorrichtern zu ermöglichen.

4.3 Anlagenbeschrieb

Für die Messung der Alterung in Phase 2 hat die BFH einen neuen Prüfstand aufgebaut. Dabei musste berücksichtigt werden, dass bei einer Alterung der Isolation mehrere Fehlerbilder auftreten können. Abbildung 2 zeigt die Stellen in einem Stator, an denen die Gefahr einer Teilentladung besteht.

Ein Durchschlag kann zwischen den Wicklungen zweier Phasen («phase to phase»), innerhalb einer einzelnen Wicklung einer Phase («turn to turn») und zwischen der Wicklung einer Phase und dem Gehäuse auftreten («phase to ground»). Je nach Lage des Fehlers müssen unterschiedliche Fehlermessverfahren eingesetzt werden.

Die Teilentladungsaktivität lässt sich durch Mikrostromstörungen erkennen, die im Betrieb nur schwer zu messen sind. Mit einem Widerstands- und Impulsprüfer können wir jedoch genaue Spannungen unterschiedlicher Form anlegen, um die PD- (Teilentladung) und PDIV-Werte im Labor zu messen.

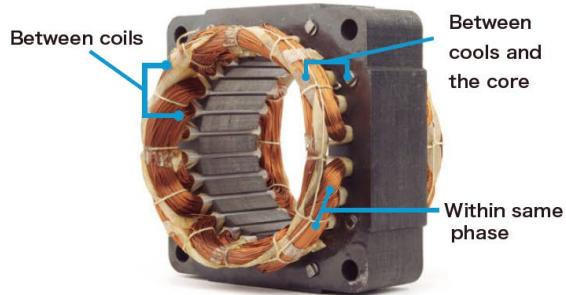


Fig.2 Locations with a high risk of partial discharge

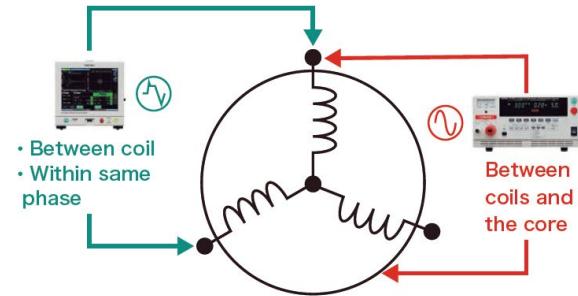


Fig.3 Test voltage when connected to the neutral point

Abbildung 2 und Abbildung 3: Impulsspannungsprüfgerät vs. Stehspannungsprüfgerät

Wenn der Stator am Sternpunkt kurzgeschlossen ist, kann die Prüfung der gefährdeten Stellen zwischen zwei Phasen oder auf einer einzelnen Phase nur durch Anlegen einer Stoßspannung erfolgen (Abbildung 3).

Im Gegensatz dazu kann die Prüfung zwischen den einzelnen Wicklungen und dem Gehäuse (Erde), mit einer hohen Wechselspannung, wie sie von einem Stehspannungsprüfgerät verwendet wird getestet werden.

Die Abbildung 4 zeigt den messtechnischen Konzeptaufbau für die Messung mit dem Impulsmessgerät (rechts) und den Stehspannungsprüfgerät (links). Beide Geräte stammen wie das verwendete Speichermessgerät und die Hochfrequenzstromsonde von der Firma HIOKI. Für die Messung der hohen Impulsspannungen wurde zudem ein Hochspannungs-Differenzialtastkopf von Micsig eingesetzt.

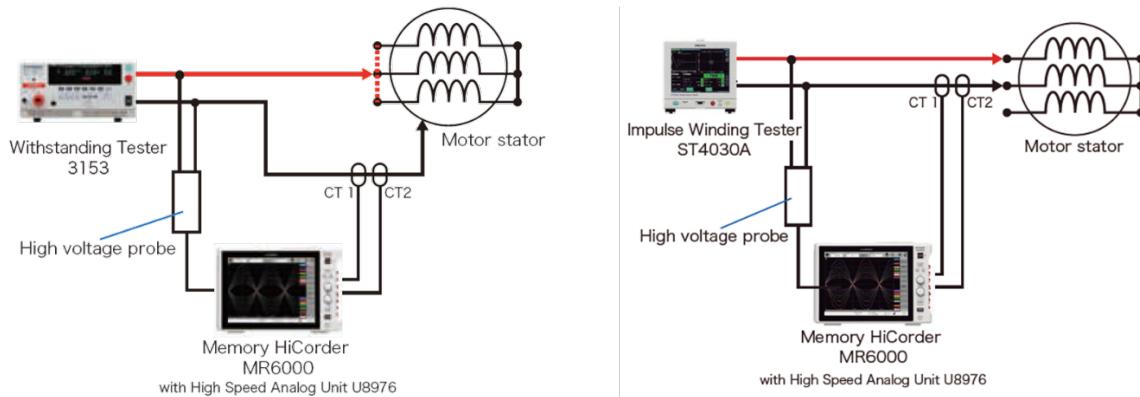


Abbildung 4: Überwachung des Gesundheitszustands der Wicklungen durch periodische Teilentladungsprüfungen; TE-Prüfung Phase-Erde durch kontinuierliche Hochspannung (link) und Phase-zu-Phase-TE-Prüfung durch HV-Impulse



Tabelle 1: Instrumente für die Teilentladungsprüfung

TE-Messinstrumente		
Oszilloskop	HIOKI MR6000	bis 200 MS/s
Hochspannungstastkopf	Micsig 20003	bis 5,6 kV, 100 MHz
Strommesssonde	HIOKI CT6711	3 Messbereiche, bis 30 A _{rms} , 120 MHz
Impulsspannungsprüfgerät	HIOKI ST4030A	bis 4,2 kV
Stehspannungsprüfgerät	HIOKI 3153	bis 5 kV _{rms} AC/DC

Wie in der Literaturübersicht^{2,3} beschrieben, wirken sich die Wellenform und die Anstiegszeit der Spannung auf das Verhalten der TE-Aktivität aus. Daher ist es wichtig zu bedenken, dass die Emulation der TE im Labor nicht unbedingt mit dem Ort und der Intensität der TE im Betrieb übereinstimmt, wenn die Erregerspannung unterschiedlich ist. Ein Vergleich der Isolationsalterung mit den Labormesungen sollte jedoch möglich sein, wobei die Impulsspannungsprüfung dem Verhalten beim Betrieb mit PWM-Frequenzumrichtern näherkommt und daher vorzuziehen ist.

4.4 Vorgehen und Methode

«SiC-Wechselrichter Testreihe»

1. Festlegung einer Basislinie für den Vergleich mehrerer wichtiger Leistungsparameter für den Wechselrichter (CDM) und das gesamte strombetriebene System (PDS). Wenn möglich, sollten Prüfungen nach Normen durchgeführt werden.
2. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Studie soll ein Testprogramm entwickelt werden, um die Auswirkungen des SiC-Wechselrichters auf die Alterung des elektrischen Isolationssystems (EIS) zu bestimmen. Höchstwahrscheinlich werden zwei Testsysteme aufgebaut (SiC-basiert und Si-basiert). Teilentladungen (TE) sind ein Symptom und manchmal auch eine Ursache für viele Arten von Verschlechterungsmechanismen der Isolierung von Motor- und Generator-Statorwicklungen. Wir werden untersuchen, ob eine Online-Messung der TE möglich ist, andernfalls werden wir regelmässige Prüfintervalle einplanen.
3. Als Option werden wir versuchen zu untersuchen, ob derselbe Prüfaufbau zur Messung von Motorlagerausfällen (oder konkreter: der Motorlagerströme) verwendet werden kann. Ansonsten werden die Motoren durch eine Vorrichtung für die Messung der Lagerströme ergänzt.

«Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap»

1. Festlegen der Zielsetzung der Research Roadmap basierend auf einem Katalog von Argumenten die aktuell gegen den Einsatz von WBG-Umrichtern aufgeführt werden.
2. Durchführen eines Workshops mit relevanten Akteuren der Schweizer Forschungsgemeinschaft, um Forschungsfragen zu formulieren, die die Entwicklung und Verbreitung von WBG-Umrichtern in der Industrie beschleunigen

² Weijun Yin. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors. IEEE Electrical Insulation Magazine, 13(6):18–23, 1997

³ Peng Wang, Andrea Cavallini, and Gian Carlo Montanari. The effects of square wave voltage rise time on pd statistics in time and frequency domain. In 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pages 262–265, 2015



4.5 Durchgeführte Arbeiten

«Testing»: SiC Wechselrichter Testreihe»

PERUN Technologies bietet mit dem LARA-100k einen plattformoffenen Wechselrichter mit SiC-basierter Endstufe mit einer Nennleistung von 5,5 kW an. Die Kernkomponente des Perun-Systems ist die Hauptplatine mit dem Plug-in-Mikrocontroller TI C2000, der die Anbindung an industrielle oder an eine dedizierte SiC-Leistungsstufe von PERUN sowie an die PERUN-Erweiterungsplatine (Kommunikation, GPIO) und die PERUN PowerDesk-Software ermöglicht. Zum Zeitpunkt der Testkonzeption war dies der einzige Industriewechselrichter mit SiC Technologie, der auf dem Markt erhältlich war. Die offizielle Webseite von Perun ([link](#)) bietet den Wechselrichter allerdings immer noch nicht standardmäßig an. Die beiden Umrichter an der Berner Fachhochschule, welche erst nach mehr als einjähriger Wartefrist geliefert wurden haben die Seriennummern 001 und 002 (!). Entsprechend gaben sich bei der Inbetriebsetzung wie auch bei den geplanten Langzeittests Probleme.

4.5.1 Systemtests

Die Prüfung des Wirkungsgrads wird gemäss der Norm IEC 61800-9-2 durchgeführt. Die Tests werden mit beiden Wechselrichtern bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen durchgeführt, um die vermuteten Vorteile der SiC-Bauelemente bei höheren Schaltfrequenzen auf den Systemwirkungsgrad zu messen.⁴

Eine höhere Schaltfrequenz wird zwar die Motorverluste aufgrund der geringeren Stromharmonischen verringern, aber auch die Schaltverluste des Umrichters erhöhen, so dass nur der Test des Gesamtsystems Aufschluss über den Gesamtwirkungsgrad des Systems gibt.

Die Wirkungsgradmessungen werden mit zwei Master/Slave-Leistungsanalysatoren PW6001 von HI-OKI durchgeführt. Es werden mehrere Betriebspunkte mit unterschiedlichen Lastfaktoren der Wechselrichter bei verschiedenen Schaltfrequenzen entsprechend den Werten in Tabelle 2 und Abbildung 5 getestet.

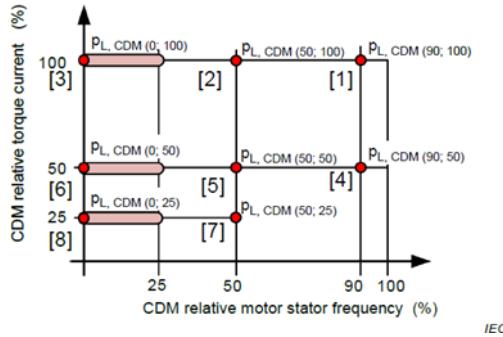


Abbildung 5: Verwendete Testpunkte gemäss IEC61800-9-2

Tabelle 2: Schaltfrequenzeinstellungen für Wirkungsgradprüfungen im Bereich der beiden Wechselrichterkapazitäten

⁴ Kohei Shirabe, Mahesh Swamy, Jun-Koo Kang, Masaki Hisatsune, Yifeng Wu, Don Kebort, and Jim Honea. Advantages of high frequency PWM in AC motor drive applications. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pages 2977–2984, 2012



Geprüfte Schaltfrequenzen (kHz)	
ATV930*	4, 10, 16
LARA-100k**	4, 10, 16, 40, 70, 100

* ATV930 = Schneider Electric ATV930U55N4

** LARA-100k = PERUN LARA-100k

4.5.2 Teilentladungstests

Um die in der Literatur beschriebenen Fehlermerkmalen (Teilentladung, Lagerschäden) in Zusammenhang mit dem Betrieb eines SiC-Umrichters möglicherweise nachzuweisen, wurde ein Testaufbau konzipiert, um vergleichende Alterungstests zwischen Induktionsmaschinen durchzuführen. Es wurden zwei identische fabrikneue General Purpose Maschinen mit einer Nennleistung von 4 kW gekoppelt und einmal von einem Standard-Industriemotor (generatorisch) und einmal von einem WBG-Umrichter (motorisch) angetrieben.

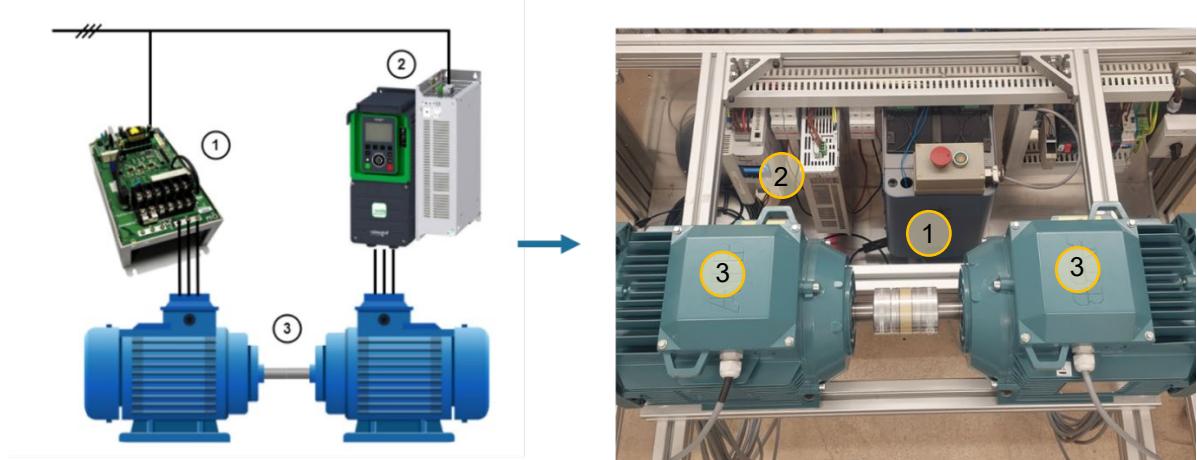


Abbildung 4: Übersicht über den vorgegebenen Versuchsaufbau mit 1) SiC-Umrichter (Perun LARA-100k) 2) Industriemotor (Lenze i550) und Rückspeiseeinheit 3) Gekoppelte Induktionsmaschinen.

Die Prüfung umfasst mehrere Schritte:

1. Vorläufige Messungen, einschliesslich der Einstellung des Wechselrichters, der Überprüfung des Wechselrichterverhaltens und der PWM-Charakterisierung.
2. Prüfung des Wirkungsgrads des Wechselrichters, der elektrischen Maschinen und des Antriebssystems.
3. Anfängliche Charakterisierung der elektrischen Maschinen, einschliesslich Messung der Teilentladungseinsetzspannung und aller zu überwachenden Parameter.
4. Langfristiger Betriebsablauf einschliesslich periodischer Prüfungen.

Während die Schritte 1-3 nach einigen Problemen bei der Inbetriebnahme durchgeführt werden konnten, traten insbesondere bei dem als 4. Schritt geplanten Langzeittest Probleme auf. Der LARA-100k Wechselrichter zeigte bereits nach ca. 100 Stunden ein auffälliges Verhalten, indem er ohne ersichtlichen Grund in zufälligen Abständen in einen Fehlermodus überging und sich selbst abschaltete. Durch eine Reduktion der Last und ständiges Monitoring, ob der Inverter nicht in einen Fehlermodus gewechselt hat, konnten weitere 200 Betriebsstunden (insgesamt 300 Stunden) erreicht werden, bevor dieser Inverter komplett ausgefallen ist.



Während dieser Inverter für eine Reparatur zurückgeschickt wurde, wurde mit dem zweiten bestellten Inverter zuerst versucht, mögliche Ursachen für das Fehlverhalten des ersten Wechselrichters zu ermitteln. Währenddessen stellte der Hersteller fest, dass der zurückgeschickte Inverter aufgrund eines teildefekten MOSFET in den Fehlerzustand geraten war. Unter der Annahme, dass es sich damit um einen einmaligen Fehler handelt, wurde der Langzeittest mit dem zweiten Inverter fortgesetzt. Innerhalb von weniger als 24 Stunden zeigte jedoch auch dieser Inverter vergleichbare Probleme und ging somit kaputt.

Der erste Inverter konnte nach einer Reparatur für die Messungen der Lagerströme verwendet werden. Sobald er jedoch für den Dauertest eingesetzt wurde, fiel er nach kurzer Zeit erneut aus. Mit insgesamt drei defekten Invertern, zweimal im Neuzustand und einmal nach Reparatur, musste der Dauertest leider aus Zeitgründen und fehlender alternative für den SiC-Wechselrichter abgebrochen werden.

Während wir der Meinung sind, dass unser Anwendungsfall ein normaler Anwendungsfall für einen industriellen Wechselrichter ist (was durch den problemlosen Betrieb des Si-basierten Wechselrichters unterstrichen wird), hat der LARA100k Wechselrichter ein Problem, so dass er bei dieser Anwendung kaputt geht. Weil der Dauertest nicht zu Ende geführt werden konnte wurde stattdessen vermehrt Zeit in eine vertiefte Literaturstudie zum Thema Teilentladung an Motorenwicklungen bei Betrieb mit SiC-Umrichtern investiert. Zudem werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den ersten 300 Stunden, sowie das generelle Vorgehen zur Bestimmung des Isolationszustands, welches als Erfolgsversprechend angesehen wurde, präsentiert.

4.5.3 Lagerstrommessung

Um die Lagerströme verlässlich zu messen sind Modifikationen am Motor notwendig. Um die Motoren aus dem zwangsweise gestoppten Dauertests nicht zu verändern wurde ein zusätzlicher Motor vom gleichen Typ zur Lagerstrommessung modifiziert, der dann für vergleichende Lagerstrommessungen mit dem Si und SiC basierten Wechselrichter betrieben wurde. Gegenüber einer Lagerstrommessung an den im Dauertest verwendeten Motoren hatte dies zudem den Vorteil, dass motorbedingte Messabweichungen ausgeschlossen werden konnten.

Für die Messung wurde der Motor zerlegt und zwei Rogowski-Spulen vom Typ CWT MiniHF 015 im Motorinneren vor den Lagern montiert. Bereits vorhandene Bohrungen in den Lagerschalen und neu angefertigte Halterungen ermöglichen die Montage der Rogowski-Spulen. Durch gezielte Durchführungen wurden die Messkabel nach aussen geführt, so dass der Motor wieder nahezu im Originalzustand betrieben werden konnte.

Die verwendeten Rogowski-Spulen besitzen eine Bandbreite von 150 Hz – 23 MHz und haben eine aussergewöhnlich hohe Sensitivität von 200 mV/A. Durch die Anordnung der Spulen werden Zirkularströme mit dem gleichen Vorzeichen gemessen. Über eine Kontaktbürste war es zudem möglich die Lagerspannung, d.h. die Spannung zwischen Motorwelle und Motorgehäuse zu messen.

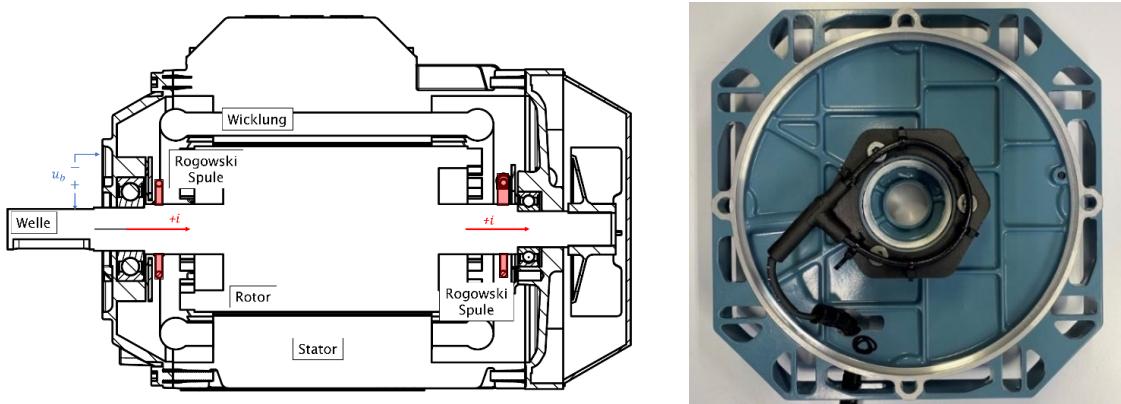


Abbildung 6 : Position und Messrichtung der verbauten Rogowski Spulen sowie eine Detailansicht zur Montage der Rogowski Spule auf der hinteren Lagerschale.

«Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap»

Am 15. Mai 2024 fand an der BFH in Bern ein Workshop mit den relevanten Akteuren aus der Wissenschaft (FH und ETH) statt um ein von Roland Brüniger und Andrea Vezzini vorbereitetes Grundlagenpapier zu besprechen und um aktuelle und geplante Forschungsaktivitäten zu präsentieren.

Im Grundlagenpapier wurden die offenen Fragen rund um den Einsatz von WBG-Umrichtern in der Industrie dokumentiert und mögliche Forschungsfragen formuliert, um diese Fragen zu beantworten. Im Workshop wurden anschliessend relevante Forschungsprojekte für eine Periode von 2024 – 2027 gesammelt und bewertet. Daraus entstand die “Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap”

Es wurden folgende offen Fragen rund um den Einsatz von WBG-Industriemrichter definiert:

- Hohe anfängliche Investitionskosten

Die höheren Anschaffungskosten von WBG-Wechselrichtern können ein erhebliches Hindernis für die Einführung darstellen, insbesondere bei Anwendungen, bei denen die Kosten ein kritischer Faktor sind. Eine detaillierte Analyse der Effizienzvorteile und der gesamten Lebenszykluskosten, bei der sowohl SiC als auch GaN bewertet werden, könnte zeigen, dass die erzielten Energieeinsparungen, z. B. im Teillastbetrieb, die anfänglich höheren Kosten in hohem Masse ausgleichen.

- Anwendungsreife und Verfügbarkeit

Ausgehend von einer Bewertung der Application Readiness Map von PECTA im Hinblick auf die Einführung von SiC- und GaN-Wechselrichtern für industrielle Anwendungen ist eines der festgestellten Probleme die begrenzte Produktionskapazität und Verfügbarkeit von WBG-Komponenten im Vergleich zu siliziumbasierten Komponenten. Diese Einschränkung kann zu Herausforderungen in der Lieferkette für Branchen führen, die grosse Mengen dieser Komponenten benötigen.

- Komplexität von Systemdesign und Implementierung

Die Entwicklung von WBG-Wechselrichtern erfordert eine Neubewertung bestehender Systemdesigns, einschliesslich Topologien (2-Level vs. Multi-Level), und Änderungen an Gate-Treiberschaltungen, Schutzschaltungen, Filtern (sowohl am Eingang als auch am Ausgang) und Wärmemanagementsystemen. Die Notwendigkeit spezieller Konstruktions- und Anwendungskenntnisse für SiC und GaN und die potenziell höhere Komplexität können für einige Hersteller und Anwender abschreckend wirken.



- Bedenken hinsichtlich Zuverlässigkeit und Langlebigkeit

SiC- und GaN-Bauelemente bieten zwar potenzielle Verbesserungen bei der Effizienz sowie der elektrischen und thermischen Leistung, doch gibt es Bedenken hinsichtlich ihrer langfristigen Zuverlässigkeit und Haltbarkeit, insbesondere in rauen Industrieumgebungen (z. B. kontinuierlicher und intensiver Betrieb, Schmutz und Staub). Die Technologie ist relativ neu, und im Vergleich zu den etablierten Siliziumtechnologien liegen möglicherweise nur wenige Langzeitdaten vor.

- Risiken für die Ausrüstung

Wechselrichter mit Wide Bandgap Devices (SiC und GaN) ermöglichen zwar höhere Schaltfrequenzen, was viele Vorteile mit sich bringt, doch kann diese Eigenschaft auch Risiken für die Geräte, einschließlich Lager, Motorisolierung und Kabel, mit sich bringen. Bei Motoren kann das schnelle Schalten aufgrund der erhöhten Spannungsänderungsrate (dv/dt) eine zusätzliche Belastung für Isolationssysteme und Lager darstellen, was deren Lebensdauer verkürzen kann.

Die WBG for Industrial Inverters Research Roadmap soll als Planungs- und Koordinationsdokument für die Beiträge zu einem White Book on Wide Bandgap (WBG) Semiconductors for Industrial Drives dienen. Sie enthält Einzelheiten zu laufenden und geplanten Forschungsaktivitäten in Bereichen, die in direktem Zusammenhang mit dem Weissbuch stehen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den angewandten und wirtschaftlichen Aspekten des Einsatzes von WBG-Halbleiter-basierten industriellen Wechselrichtern.



4.6 Ergebnisse SiC-Wechselrichter Testreihe

4.7 Systemtests

Die an den Wechselrichtern Perun LARA und Altivar durchgeführten Tests zum Wirkungsgrad zeigen, dass der Wechselrichter mit SiC-Halbleitern einen deutlich besseren Wirkungsgrad aufweist, sobald die Schaltfrequenz steigt (Abbildung 8, rechts). Es zeigt sich auch, dass eine Schaltfrequenz von 100 kHz wie es der LARA-Wechselrichters ermöglicht aus Sicht des Wechselrichters und des Systemwirkungsgrades zu hoch ist, da hohe Schaltverluste auftreten (Abbildung 8, links). Es zeigt sich auch, dass eine Schaltfrequenz von 100 kHz wie es der LARA-Wechselrichters ermöglicht aus Sicht des Wechselrichters und des Systemwirkungsgrades zu hoch ist, da hohe Schaltverluste auftreten (Abbildung 8, links). Die Wirkungsgrade bei tiefer Schaltfrequenz zeigen ähnlich Wirkungsgrade, allerdings fällt auf, dass im Teillastbetrieb der SiC-Wechselrichter einen schlechteren Wirkungsgrad hat (Abbildung 8, rechts). Dies steht im Gegensatz zu den theoretisch berechneten Werten⁵ (Abbildung 7) und weist darauf hin, dass der LARA-Umrichter einen besonders hohen Nebenverbrauch hat.

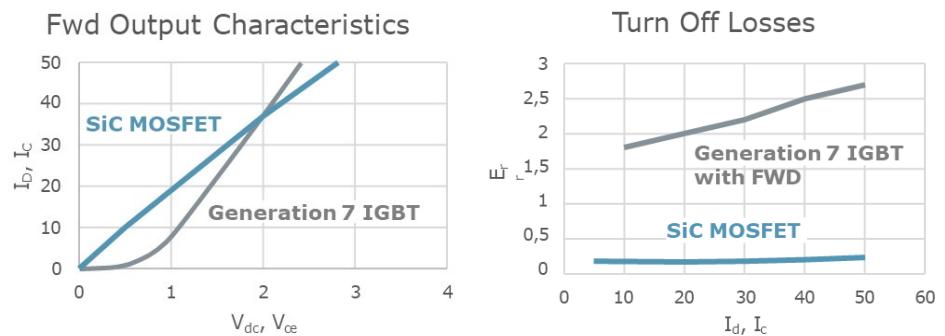


Abbildung 7: Im Teillastbereich geringere Spannungsabfälle bei SiC-Halbleitern (Leitverluste links) und tiefe Abschaltverluste (rechts) sollten zu kleineren Wirkungsgradverlusten und Energieeinsparungen im Teillastbereich führen.

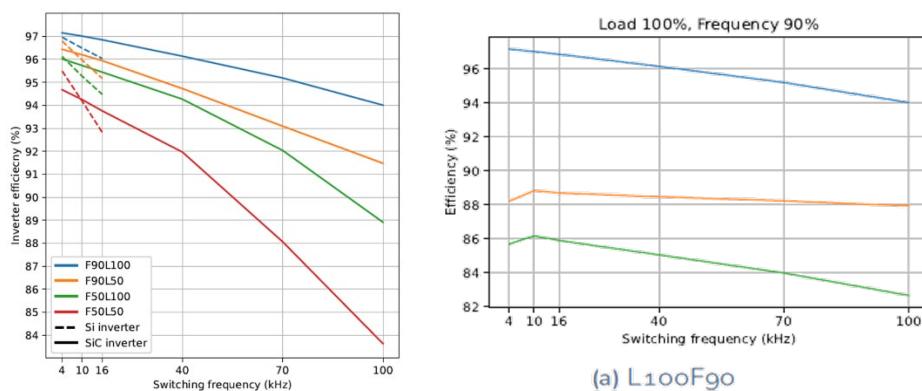


Abbildung 8: Messresultate des LARA SiC-Umrichters weisen bei Teillast (orange und rote voll ausgezogene Kurven) bei kleinerer Schaltfrequenz einen tieferen Wirkungsgrad auf als der Schneider Si-Umrichter (orange und rote gestrichelte Linie). Auf der rechten Graphik ist eine Zunahme des Gesamtwirkungsgrads des Antriebssystems (grüne Linie) bei höherer Schaltfrequenz sichtbar aufgrund des verbesserten Wirkungsgrads des Motors (orange Linie). Der SiC-Wechselrichter Wirkungsgrad sinkt linear (blaue Linie)

Der Gesamtwirkungsgrad (Umrichter und Motor) erhöht sich gemäss Literatur bei höherer Schaltfrequenz zuerst, weil die geringeren Harmonischen im Ausgangstrom zu weniger Verlusten im An-

⁵ Webinar: Silicon Carbide in AC Motor Drives; Semikron Danfoss, <https://youtu.be/RrRQ0FpnjyQ?t=564>



triebsmotor führen. Erhöht man die Schaltfrequenz noch weiter dominieren allerdings die Schaltverluste im Umrichter, während der Motorwirkungsgrad nicht mehr weiter verbessert werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad beginnt wieder zu sinken.

Für diese spezielle Anwendung eines 50 Hz-Industrieinduktionsmotors bringt eine Erhöhung der Schaltfrequenz über 10 kHz bei unserem SiC-Wechselrichter keine Vorteile für den Wirkungsgrad des Systems (Abbildung 8).

4.8 Grundlagen Teilentladungstests

An den Anschlägen eines durch einen Umrichter angetriebenen Motors entstehen durch die gepulste Ansteuerung des Umrichters (PWM oder SV-PWM) aufgrund der Reflexion der Welle an der Motorwicklung eine Überspannung. Die Kabellänge zwischen Frequenzumrichter und Motor und die Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung spielen eine entscheidende Rolle.

Eine Möglichkeit die entstehenden Überspannungen abzuschätzen, gibt folgende Gleichung. Sie berechnet eine kritische Kabellänge ab der ein angelegter Spannungsimpuls durch Ausbreitung als Welle und Reflektion in einer Verdoppelung der Spannung am Kabelende (der Motorenklemme) resultiert.

$$l_c = \frac{t_r v}{2}$$

Mit l_c der kritischen Kabellänge, t_r der Anstiegszeit der Spannungsflanke und v der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Kabel (ca. 150 m/μs).

Ist die Kabellänge deutlich kürzer als l_c sind keine grossen Überspannungen zu erwarten. Ist l_c deutlich länger, ist mit Überspannungen bis zum Faktor zwei zu rechnen. Die genaue Überspannung ist aber von weiteren Faktoren wie dem Impedanzverhältnis zwischen Kabel und Motorwicklung abhängig.

Unter typischen Betriebsbedingungen sollte die maximale Spannung nicht höher als die doppelte Zwischenkreisspannung ausfallen⁶. Einige Studien berichten jedoch von Spannung grösser als die doppelte Zwischenkreisspannung entweder durch sogenannte Doppelpulse⁷ oder durch Antiresonanzeffekte⁸ welches eine erhöhte Sternpunktspannung zur Folge haben können.

Mit den gemessenen Anstiegszeiten von 30 ns für den SiC und 80 ns für den Si Umrichter ergeben sich kritische Kabellängen von 2,25 m bzw. 6 m. Bei Messungen mit 1,7 m Kabel, welches kürzer als die kritische Kabellänge beider Umrichter ist, konnten beim SiC Umrichter Überspannungen bis 1,1 kV und 750 V beim Si Umrichter gemessen werden (Abbildung 9). Solche hohen Spannungen könnten zu Teilentladungen führen und die Lebensdauer der Maschine verkürzen.

Insbesondere beim Ersatz eines Silizium-Umrichters durch einen Silizium-Karbid-Umrichter kann es daher vorkommen, dass die bisher unkritische Kabellänge nun plötzlich zum Problem wird und der Motor deutlich stärker belastet wird, als vielleicht angenommen.

⁶ Shan Yin, King Jet Tseng, Rejeki Simanjorang, Yong Liu, and Josep Pou. A 50-kW High-Frequency and High-Efficiency SiC Voltage Source Inverter for More Electric Aircraft. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 64(11), 2017

⁷ R. J. Kerkman, D. Leggate, D. Schlegel and G. Skibinski, "PWM inverters and their influence on motor overvoltage," *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Atlanta, GA, USA, 1997, pp. 103-113 vol.1, doi: 10.1109/APEC.1997.581440.

⁸ S. Sundeep, J. Wang, A. Griffó and F. Alvarez-Gonzalez, "Antiresonance Phenomenon and Peak Voltage Stress Within PWM Inverter Fed Stator Winding," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 12, pp. 11826-11836, Dec. 2021

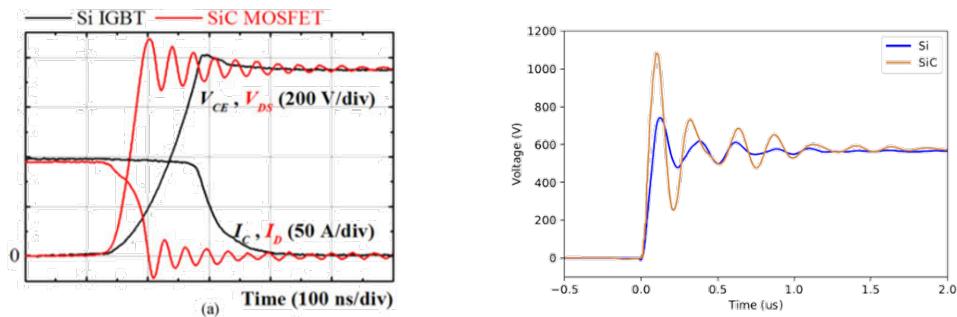


Abbildung 9: Steilere Schaltflanken erzeugen bei Kabellängen nahe an der kritischen Kabellänge höhere Überspannungen. Links Messungen aus einer Publikation, rechts Messung im Vergleich aus dem BFH-Labor; Messungen mit 1,7 m Kabel.

Werden jedoch Kabel mit Längen oberhalb der kritischen Länge für Silizium-Umrichter ($> 5 - 10$ m) verwendet, was in der Praxis häufig der Fall ist und im Standard zur Messung von Umrichterverlusten durch die Vorgabe eines 15 m langen Anschlusskabels auch berücksichtigt wird, treten bei beiden Umrichterarten die gleichen maximalen Spannungsspitzen auf. Auch dies konnte experimentell nachgewiesen werden. In einem solchen Fall dürfte die Alterung der Isolation durch Teilentladung nicht nennenswert unterschiedlich ausfallen. Es sei denn, die TE-Eigenschaften und dadurch hervorgerufenen Schäden verändern sich durch die unterschiedlichen Anstiegszeiten sehr stark. Der Test an der Berner Fachhochschule wurde deshalb mit einem 15 m langen, geschirmten Kabel aufgebaut, um genau dies zu untersuchen.

Die Teilentladungs-Einsetzspannung (Partial Discharge Inception Voltage, PDIV) könnte der primäre Parameter zur Überwachung des Zustands der Isolation sein, der geplante Langzeittest soll deshalb zeigen, wie die PDIV mit der effektiven Alterung zusammenhängt und wie sie von den Prüftechniken (Anstiegszeit, Wellenform, Wechselstrom oder Impuls) abhängt.

4.8.1 Literaturstudie

Unter anderem auch weil der eigene Langzeittest nicht bis zum Ende durchgeführt werden konnte, wurde nach anderen Arbeiten gesucht, die sich mit der Auswirkung der schnellen Spannungsänderungen von SiC-Wechselrichtern auf die Isolationslebensdauer auseinandersetzen. Zusätzlich wurde aufgearbeitet, warum sich die schädigende Wirkung durch TE, bei gleicher Spannung aber unterschiedlicher Anstiegszeit, unterscheiden könnten.

In ⁹ wurde der Einfluss der schnellen Anstiegszeiten auf SiC Wechselrichtern auf die Motorenisolation untersucht. In Ihren Versuchen wurden neun Motorprüfinge mit unterschiedlichen Zwischenkreisspannungen (600, 800 und 1000 V), Schaltfrequenzen (20, 40, 60 kHz) und Anstiegszeiten (20, 40, 60 ns) untersucht. Der Motor wurde jedoch ohne Rotor und bei stark erhöhter Temperatur (230 °C) getestet, um die Alterung zu beschleunigen. Die thermische Alterung wurde dann von der elektrischen Alterung durch ein mathematisches Modell getrennt. Es bestehen jedoch Zweifel, ob diese Methode der Separierung der Alterung zuverlässig ist und ob die stark erhöhte Temperatur nicht auch einen grossen Einfluss auf die elektrische Alterung hat, z.B. weil sich das TE-Verhalten bei erhöhter Temperatur ändert. Auch zeigen die drei Prüflinge, die bei Nennspannung (600 V) betrieben wurden, keine konsistenten und nachvollziehbaren Ergebnisse. Beispielsweise tritt die grösste elektrische Alterung bei kleinster PWM-Frequenz und längster Anstiegszeit auf, welches im Widerspruch zu den aktuell vermuteten Ursachen der Alterung steht, jedoch durch Fertigungstoleranzen der Motorenwicklung erklärt werden

⁹ D. Hewitt, S. Sundeep, J. Wang, A. Griffo, M. Diab and X. Yuan, "An Experimental Assessment of the Impact of High dv/dt SiC Converters on Insulation Lifetime of Electrical Machines," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8



könnte. Die Autoren schreiben, dass in erster Linie die Zwischenkreisspannung darüber entscheidet, ob TE auftreten, und wenn ja, die PWM-Frequenz der zweite entscheidende Faktor für die Alterung ist.

Bereits vor dem Aufkommen der WBG-Halbleiter wurde in verschiedenen Arbeiten der Einfluss von Anstiegszeit, der Polarität, die Zeit zwischen den anliegenden Pulsen und der Frequenz auf das TE-Verhalten, insbesondere die schädigende Wirkung auf Isolationsprüflinge, untersucht.

In den Arbeiten^{10, 11} wurde der Einfluss der Anstiegszeit, Frequenz und Polarität auf die Isolation gemessen. Die Arbeiten unterscheiden sich zwar durch die untersuchten Anstiegszeiten (40 ns bis 100 ns, bzw. 50 ns bis 16 µs) und Frequenzen (20 kHz, bzw. 1, 3, 5 kHz), kommen aber zum gleichen Ergebnis. Kürzere Anstiegszeiten und höhere Frequenzen sind besonders schädlich für die Isolation. Besonders interessant an der erstens der beiden Arbeiten ist, dass die schädigende Wirkung unterhalb einer Anstiegszeit von 70 ns deutlich grösser ist als oberhalb. Dies entspricht ungefähr der Grenze zwischen den Anstiegszeiten von SiC-MOSFET, die schneller sind, und Si-MOSFET, die typischerweise etwas langsamer sind.

Eine Vielzahl von Arbeiten befasst sich insbesondere auch mit der Entstehung, der Charakterisierung und den Möglichkeiten zur Beseitigung von Überspannungen. Hier ist insbesondere die Arbeit¹² zu nennen. Sie behandelt die bekannten Überspannungen < 2 pu, Überspannungen > 2 pu sowie Mitigationstechniken.

Abschliessend ist ausgehend von der TE-Theorie folgendes zu erwarten:

- Zur Bildung einer TE ist ein freies Startelektron erforderlich. Dieses muss bei intakter Isolation erst z.B. durch ein hohes angelegtes elektrisches Feld aus dem Isolator herausgelöst werden, was eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, die als Zündverzögerung bezeichnet wird. Werden Impulsspannungen mit schnellem dU/dt angelegt, so steigt die Spannung auch nach Überschreiten der theoretischen PDIV während des Zündverzugs weiter an. Die Spannung bei der «verspäteten» Zündung der TE ist höher und ihre Energie deshalb grösser.
- Während bei einem langsamem Spannungsanstieg mehrere TE mit niedriger Energie gezündet werden können, ist bei einem schnellen Spannungsanstieg die Wahrscheinlichkeit grösser, dass stattdessen nur eine TE mit höherer Energie gezündet wird.
- Nach der Zündung einer TE liegt eine Raumladungsverteilung vor, die dem angelegten Feld entgegenwirkt. Bevor eine weitere TE gezündet werden kann, muss diese Raumladung erst abgebaut werden. Wie lange dies dauert, hängt stark von der Leitfähigkeit des Isolators ab, die wiederum stark temperaturabhängig ist. Schnell aufeinanderfolgende Pulse sind daher nicht unbedingt schädlicher, da es durch die Raumladung nicht zur Zündung von TE kommt.
- Der Effekt der Raumladung ist auch für das unterschiedliche TE-Verhalten bei unipolaren und bipolaren Pulsen verantwortlich.

Zusammengefasst beschäftigten sich viele Arbeiten mit der experimentellen Alterung von Isolationsproben oder der Entstehung und Modellierung der Überspannung. Praxisnahe Untersuchungen der Isolationslebensdauer von Motoren, unter Verwendung von industriellen Umrichtern, wurden bisher jedoch selten durchgeführt.

¹⁰ Weijun Yin, "Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 18-23, Nov.-Dec. 1997

¹¹ P. Wang, A. Cavallini and G. C. Montanari, "The influence of repetitive square wave voltage parameters on enameled wire endurance," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 1276-1284, June 2014

¹² R. J. Kerkman, D. Leggate, D. Schlegel and G. Skibinski, "PWM inverters and their influence on motor overvoltage," *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Atlanta, GA, USA, 1997, pp. 103-113 vol.1



4.8.2 Messresultate

Die Messresultate sind in drei Abschnitte gegliedert. Im ersten Abschnitt werden die gemessenen PWM-Signale der beiden Inverter charakterisiert. Im zweiten Abschnitt werden die TE-Messungen und die Bestimmung der PDIV erläutert. Zum Schluss werden die vorläufigen Resultate zur Isolationsalterung diskutiert.

PWM-Charakterisierung

Für den Lebensdauertest wurden der SiC-basierte Wechselrichter Perun LARA-100k und der Si-basierte Wechselrichter Lenze i550 verwendet. Ein Vergleich der Phasen-zu-Phasenspannung für einen Schaltvorgang zeigt Abbildung 10. Durch die 15 m Kabellänge sind die Unterschiede in der Überspannung nicht mehr so gross wie bei kürzeren Kabellängen. Im Mittel beträgt die Überspannung 1090 V bei SiC und 1030 V beim Si Wechselrichter, bei einer Zwischenkreisspannung von 580 V. Die Phasen-zu-Erde Spannungen erreichen Spitzenwerte von 780 V beim SiC und 680 V beim mit Si-Endstufe betriebenen Motor. Die Anstiegsgeschwindigkeit des SiC beträgt 30 ns ($18'000 \text{ V}/\mu\text{s}$) bzw. 80 ns ($6'750 \text{ V}/\mu\text{s}$), gemessen von 10% bis 90% V_{dc} , d.h. ca. 60 bis 540 V.

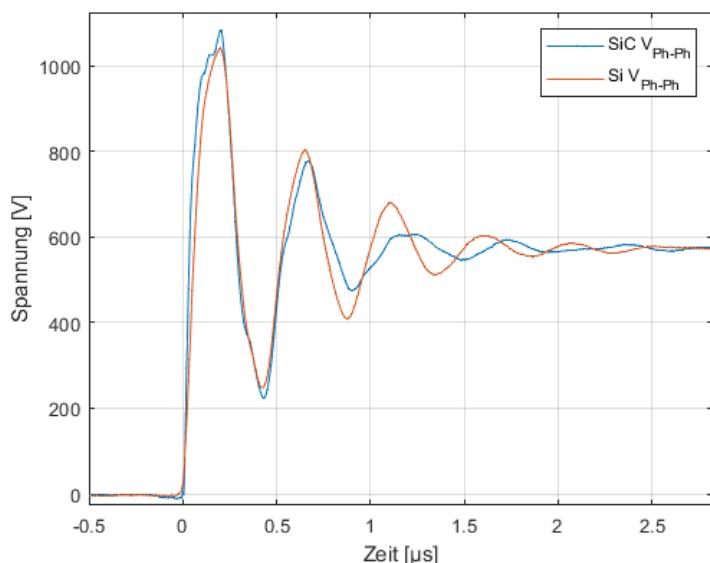


Abbildung 10: Vergleich der Phasen-Phasenspannung, gemessen an den Motorenterminals, bei Ansteuerung mit dem SiC und Si Umrichter und 15 m Kabellänge.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Motorenfrequenz während dem Dauertest nicht höher als ca. 38 Hz eingestellt wird, da der Lenze Wechselrichter sonst Übermodulation verwendet. Dabei bleiben Phasen während gewissen Zeiten auf $+V_{dc}$ oder 0 V und schalten nicht. Da der LARA-Inverter durch SVPWM bis zu höheren Frequenzen keine Übermodulation verwendet, würden sich die angelegten Schaltvorgänge unterscheiden, was das Alterungsverhalten verändern könnte.

Teilentladungsprüfung (TE-Prüfung)

Eine Möglichkeit die Alterung von Isolationen zu untersuchen ist die Messung der PDIV, welche mit zunehmender Alterung sinkt. Da Teilentladungen an Motoren jedoch an verschiedenen Stellen auftreten können und deren Messung unterschiedliche Prüfverfahren voraussetzen, stellte sich die Frage welche Methode am besten ist, um die Alterung nachzuweisen.



Gemäss DIN EN 60034-18-41 wird unterschieden zwischen einer TE-Prüfung bei Netzfrequenz und einer TE-Prüfung bei Impulsspannung.

Für die Prüfung bei Netzfrequenz wird eine Sinusspannung von 50 Hz angelegt. Die Amplitude kann schrittweise erhöht werden, um die PDIV zu messen oder nur auf die maximale zu bestehende Prüfspannung für eine Pass/Fail-Prüfung eingestellt werden. Die PDIV ist die Prüfspannung, bei der mindestens eine TE pro Periode (20 ms) gemessen wird, und wird bei Prüfung mit Sinusspannung in V_{rms} angegeben. Diese Methode kann mit offenem Sternpunkt für die Prüfung Phasen gegen Phasen oder bei geschlossenen Sternpunkt für die Prüfung Phasen gegen Erde eingesetzt werden.

Für die Prüfung bei Impulsspannung, auch Stossspannungsprüfung genannt, werden Spannungsimpulse angelegt. Meist wird die RPDIV (Repetitive Partial Discharge Inception Voltage) bestimmt. Dafür wird die Impulsspannung, diesmal definiert als V_{pp} , schrittweise erhöht und jeweils eine definierte Anzahl an Pulsen pro Spannung (oftmals 10) angelegt. Die PDIV, die erste Spannung, bei der eine TE auftritt, kann bei diesem Test aufgrund des stochastischen Prozesses der TE, grossen Schwankungen unterliegen. Der RPDIV hingegen bezeichnet die Prüfspannung ab der bei mindestens 5 Spannungspulsen (oder 50% bei mehr / weniger als 10), eine TE gemessen wurde. Der RPDEV unterliegt deshalb geringeren Variationen. Diese Prüfung kann für Phasen zu Phasen Prüfung und Phasen zu Erde Prüfung eingesetzt werden, auch bei geschlossenem Sternpunkt. Generell wird diese Prüfung als realitätsnäher für Motoren unter Umrichterbetrieb angesehen. Die Anstiegszeit des Impulstesters ist abhängig vom Prüfling und betrug für unsere Motoren rund 200 ns.

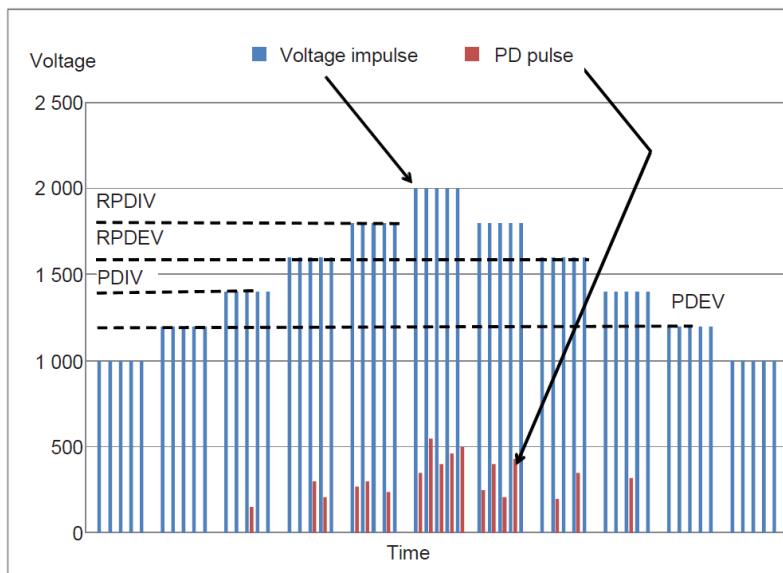


Abbildung 11: Verfahren zur Bestimmung von PDIV (Einsetzspannung), RPDIV (Repetitive Einsetzspannung) und der Aussetzspannungen nach IEC 61934.

Unabhängig von der angelegten Spannung können verschiedene TE-Detektionsverfahren eingesetzt werden. Während dieser Arbeit wurden die Spannung und der Strom während jeder Prüfung gemessen und aufgezeichnet und anschliessend in Python ausgewertet. Die Absolutwerte der Strommessung (Polarität des Strompeaks ist nicht relevant) wurden hochpassgefiltert, um durch TE verursachte Störungen im Strom zu erkennen. Das Hochpassfilter war von 6. Ordnung und hatte eine Grenzfrequenz von 2 MHz, für die Messungen geprüft bei Sinusspannung, und 50 MHz bei der Impulsprüfung. Das gefilterte Signal wurde anschliessend auf Stromspitzen untersucht, wobei eine Stromspitze von grösser als 3,5 mA als TE eingestuft wurde.



Der gleiche Ansatz mit Filterung kann auch auf das Spannungssignal angewendet werden. In unseren Messungen war auf dem Spannungssignal jedoch ein grösseres Rauschen und die Unterscheidung zwischen TE und Rauschen deshalb schwieriger.

Typische TE-Messungen sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 gezeigt.

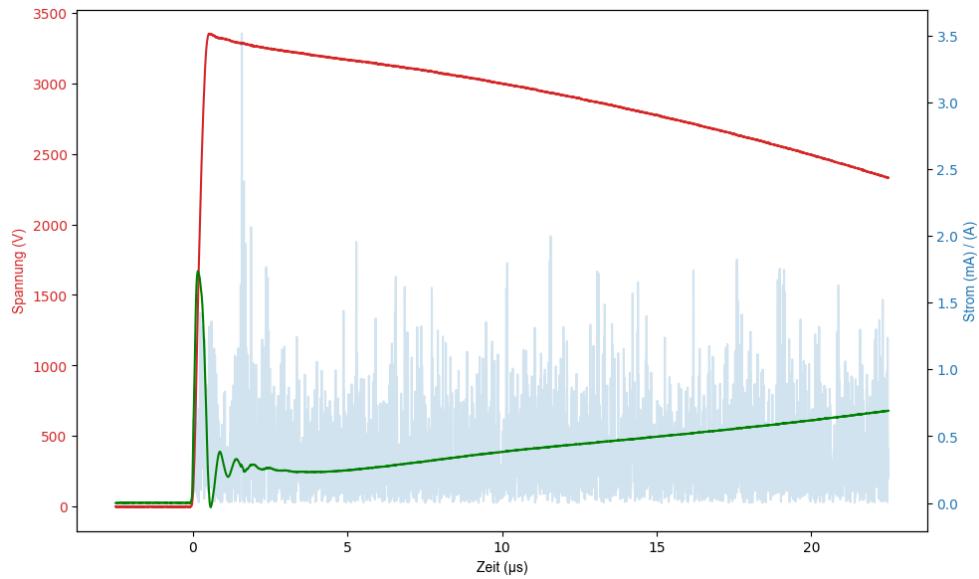


Abbildung 12: Strom (grün) und Spannungsverlauf (rot) bei einer Impulsprüfung. In blau ist das gefilterte Stromsignal gezeigt, welches eine TE mit geringer Intensität von 3.5 mA aufweist. Im ungefilterten Signal ist die TE nicht zu erkennen.

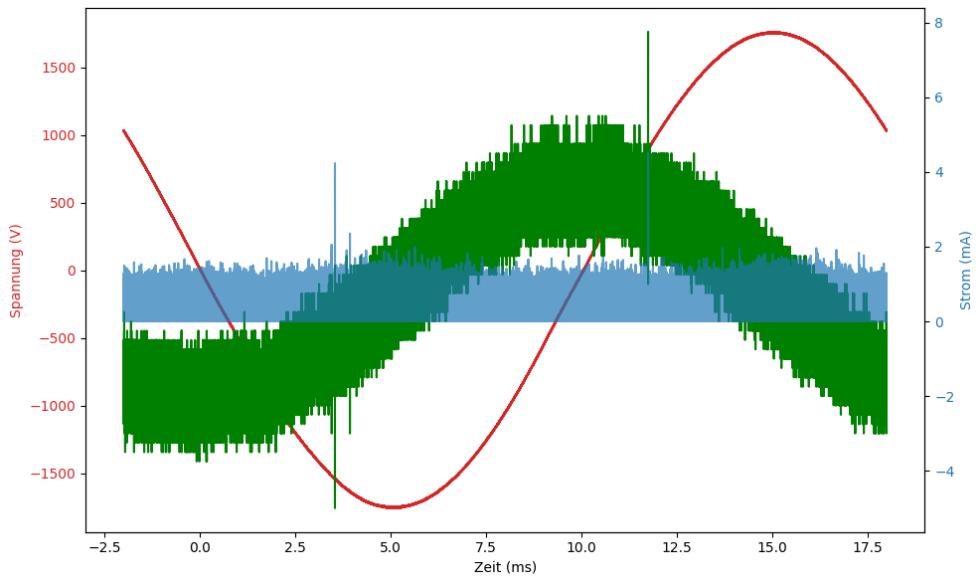


Abbildung 13: Strom (grün) und Spannungsverlauf (rot) bei einer Stehspannungsprüfung bei 50 Hz. Bei einer Stehspannungsprüfung fliessen nur geringe kapazitive Ströme da der Sternpunkt offen ist oder eine Phase-zu-Erde Prüfung durchgeführt wird. Es sind zwei TE mit geringer Intensität zu erkennen.



Messkonfigurationen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten wie der Motor während den Tests angeschlossen werden kann. Für Impulstests gibt es die Möglichkeiten «Offen», «Stern», «Dreieck». Bei jeder Konfiguration können dann noch Anschlüsse des Impulstesters an die einzelnen Phasen variiert werden, so dass 9 Möglichkeiten entstehen.

Für die Stehspannungsprüfung besteht die Möglichkeit, alle Phasen gleichzeitig («Dreieck») gegen Erde zu messen, die Phasen einzeln gegen Erde zu messen oder die Phasen einzeln, getrennt gegeneinander zu messen, so dass 7 Möglichkeiten entstehen. Eine Übersicht über die Anschlussmöglichkeiten zeigt Abbildung 14.

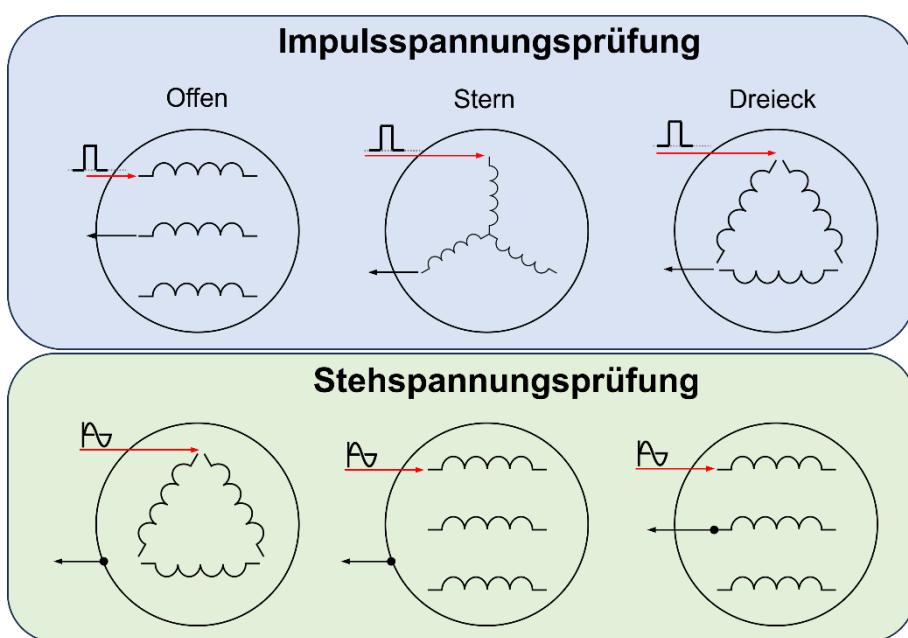


Abbildung 14: Anschlussmöglichkeiten für Impuls- und Stehspannungsprüfungen.

Diese grosse Anzahl von Messkonfigurationen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Deshalb wurde, nachdem genügend Messungen durchgeführt wurden, untersucht, welche Messkonfiguration für die Beurteilung der Isolationsalterung am besten geeignet ist. Trägt man die TE-Wahrscheinlichkeit, d.h. den Anteil der TE-erzeugenden Impulse geteilt durch die Anzahl der anliegenden Impulse, für die drei Möglichkeiten «Offen», «Stern» und «Dreieck» auf, so zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang (Abbildung 15). Für diese Auswertung wurden die Messdaten beider Motoren, dem Si und SiC Wechselrichter betriebenen, zusammengefasst.

Die Grafik zeigt, dass unterhalb einer Spannung von 2 kV TE selten (< 10%) auftreten. Die Wahrscheinlichkeit steigt für die «Dreieck» Konfiguration am schnellsten an. Dies lässt sich damit erklären, dass die volle Impulsspannung sowohl über eine Wicklung, parallel dazu aber zusätzlich über die beiden anderen Wicklungen abfällt. Damit sind mehr Wicklungen mit einer Prüfspannung beaufschlagt und es kommt entsprechend zu mehr TE. Das Anlegen einer Prüfspannung in der Konfiguration «offen» erlaubt eventuell eine gezielte Aussage darüber, in welcher Wicklung die Isolation am schlechtesten ist, dies ist aber nicht das Hauptziel dieser Arbeit. Um den Gesamtzustand einer Isolation zu messen, sollten Messungen in der «Dreieck» Konfiguration ausreichen. Dies ist von Vorteil, da der Motor in den Tests ebenfalls in Dreieckschaltung verkabelt ist und so keine Änderung der Verkabelung für die Messungen nötig ist.

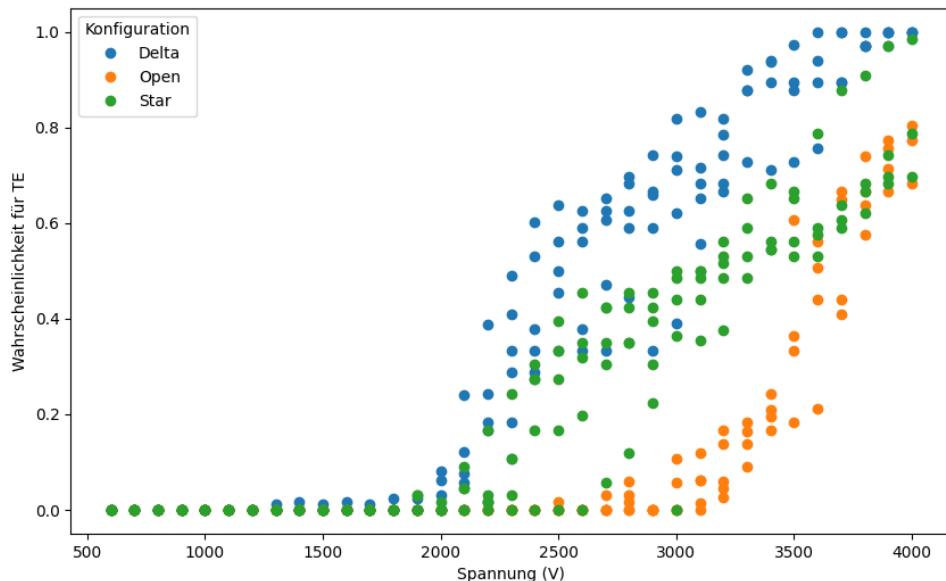


Abbildung 15: Wahrscheinlichkeit des Auftretens von TE beim Anlegen von Impulsen unterschiedlicher Spannungen aufgeteilt nach der Anschlusskonfiguration.

Die dargestellten Daten zeigen, dass die von den Wechselrichtern erzeugte Überspannung von maximal 1,1 kV deutlich unterhalb der Spannung liegt, die eine erhöhte TE-Wahrscheinlichkeit aufweist. Einige Punkte sind jedoch zu beachten:

- Auch eine Wahrscheinlichkeit von nur 1 % würde bei einer Umrichter PWM Frequenz von 16 kHz (der Testfrequenz beider Umrichter) zu 160 TE pro Sekunde führen. SiC Wechselrichter erreichen aber Frequenzen bis 100 kHz.
- Die TE-Prüfungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, während der Motor im Betrieb unter Voll-Last bis zu 140 °C erreicht. Der Zusammenhang von TE-Einsetzspannung und Temperatur ist sehr komplex, nimmt im Allgemeinen jedoch ab. Eine konstante von -4 V/K wird in ¹³ genannt.
- Die Anstiegsgeschwindigkeit und Spannungsform der Inverter und des Prüfgeräts sind nicht identisch. Dies kann zu Unterschieden in der TE-Aktivität führen.
- Die PDIV oder RPDIV kann je nach durchgeföhrtem Test sehr unterschiedlich sein. Dies zeigen unter anderem die Unterschiede der Einsetzspannung je nach Messkonfigurationen. Noch deutlicher wird der Unterschied so bald nachfolgend die Prüfung unter Sinusspannung diskutiert wird.

Um das TE-Verhalten zu beurteilen können die im Versuch ermittelten Werte für PDIV und RPDIV daher nicht direkt mit den im Betrieb auftretenden Spannungen verglichen werden. Stattdessen sollten Rückschlüsse nur aus der Änderung von PDIV und RPDIV gezogen werden, die unter den gleichen Bedingungen gemessen wurden.

Ebenfalls stark ausgeprägt können Unterschiede der PDIV zwischen baugleichen Motoren ausfallen. So hatte der Motor «A», der mit SiC Wechselrichter betrieben wurde, bereits beim Start des Versuchs

¹³ A. Binder. Motor Development for Electrical Drive Systems. Vorlesungsfolien. Technische Universität Darmstadt.



(fabrikneuer Motor) deutlich geringere TE-Einsetzspannungen als der mit Si betriebene Motor. Abbildung 16 zeigt dies deutlich. Die Grafik zeigt die Wahrscheinlichkeit für TE beider getesteter Motoren zu Beginn des Tests. Als rote Linie ist die Wahrscheinlichkeit von 50% markiert, dies erleichtert das Herauslesen der RPDI. Erste TE wurden beim SiC Wechselrichter betriebenen Motor bei 1,3 kV gemessen, während der Motor «B» erst ab 2 kV TE aufwies. Auch die Repetitiven TE-Einsetzspannungen unterscheiden sich stark. Mit 2,2 kV zu 3,3 kV in «Dreieck», 2,4 kV zu 3,6 kV in «Stern» und 3,5 kV zu 3,9 kV in der «Offen» Konfiguration.

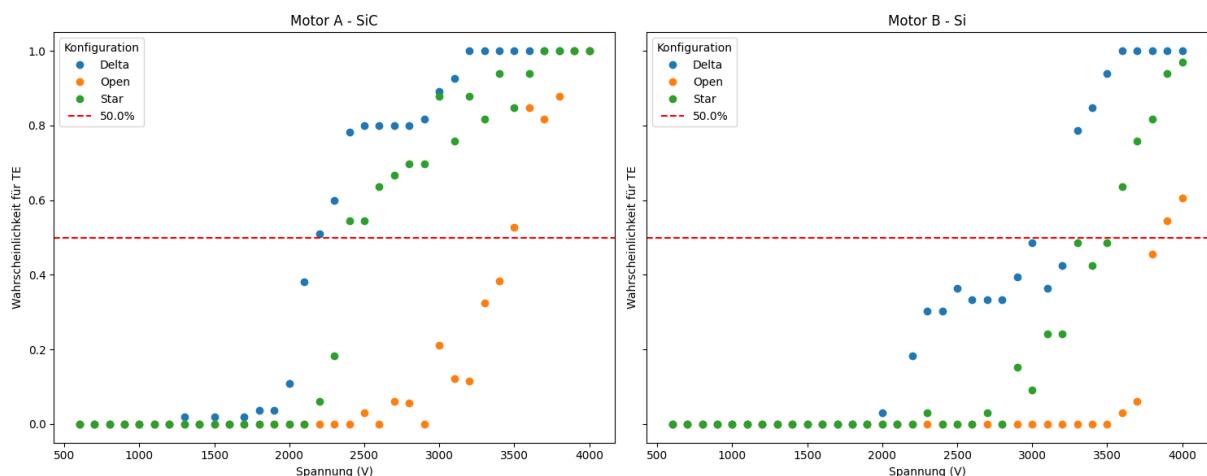


Abbildung 16: Wahrscheinlichkeit für TE beim Anlegen von Impulsen unterschiedlicher Spannung für den Motor «A» der mit SiC Wechselrichter betrieben wird und Motor «B» der mit Si Wechselrichter betrieben wird. Messungen bei fabrik neuem Motor vor dem Start des Langzeittests.

Derart grosse Unterschiede können sich auch auf das zukünftige Alterungsverhalten auswirken und sind sicherlich einer der Hauptgründe, warum viele Alterungsversuche in anderen Arbeiten nicht an kompletten Motoren, sondern an verdrillten Prüfkörpern aus Lackdraht durchgeführt werden. Ein weiterer Grund dürfte die lange Prüfdauer sein, bis ein Unterschied in der Alterung messbar wird.

Isolationsprüfung bei Netzfrequenz

Die Isolationsprüfung mit Sinusspannung wurde weniger detailliert untersucht als die Isolationsprüfung mit Stossspannung. Der zur Verfügung stehende Datensatz an Messungen ist daher deutlich kleiner und die statistischen Auswertungen sind daher nicht gleich belastbar. Trotzdem könnten wichtige Unterschiede festgehalten werden.

Die Wahrscheinlichkeit für TE gegenüber der Spannung (Effektivwert) zeigt Abbildung 17. Interessant ist sicherlich der grosse Unterschied zwischen dem mit Stossspannung und dem mit Sinusspannung ermittelte PDIV. Unter Sinusspannung wurden für Motor «A» erste TE ab 850 V (1.2 kV_p) gemessen, bei Motor «B» ab 920 V (1.3 kV_p). Die PDIV für Stossspannungsmessungen ist höher und unterliegt grösseren Schwankungen zwischen den Motoren «A» und «B». Ab einer Prüfspannung von 1 kV (1.4 kV_p) treten unter Sinusspannung TE mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf, während dazu bei Prüfung mit Impulsspannung deutlich höhere Spannungen notwendig sind. Die Unterschiede entstehen aufgrund der stochastischen Natur von TE, dem Zündverzug und der Spannungsart (Unipolar für Impulsprüfung, Bipolar bei Prüfung mit Sinusspannung).

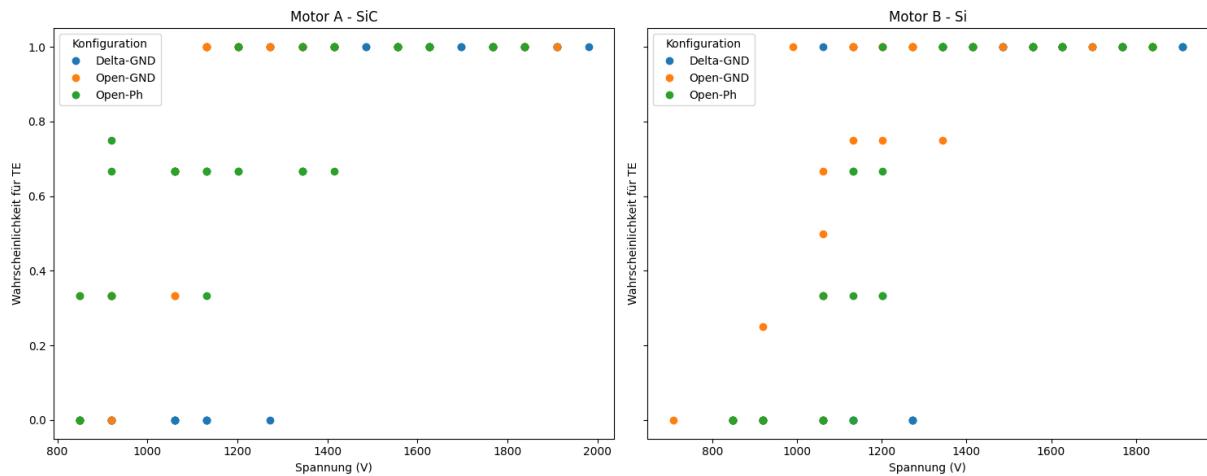


Abbildung 17: Wahrscheinlichkeit für TE in Abhängigkeit der Prüfspannung für den mit SiC Wechselrichter betriebenen Motor «A» und den mit Si Wechselrichter betriebenen Motor «B».

Alterungsverhalten

Der Verlauf von RPDIV über die ersten 300 Stunden Motorlaufzeit, gemessen für beide Motoren nach 0, 50, 100, 200 und 300 Stunden zeigt Abbildung 18.

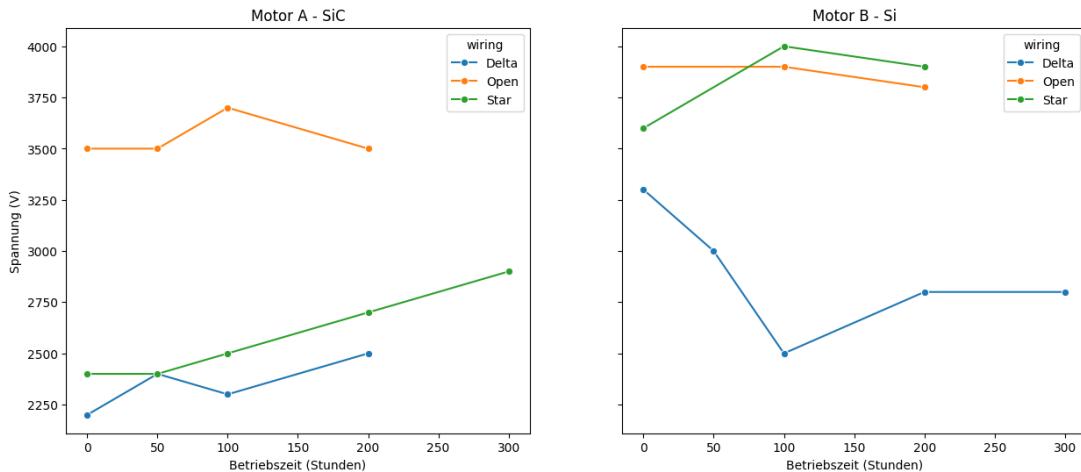


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der RPDIV beider Motoren gemessen für unterschiedlichen Messkonfigurationen.

Die bisherigen Ergebnisse lassen keine fundierten Aussagen über die Alterung der Isolierung zu. Zum einen liegen Messungen über einen zu kurzen Zeitraum vor, zum anderen ist die Streuung zwischen den Messungen zu gross. Generell ist es auch unwahrscheinlich, dass nach dieser kurzen Betriebszeit bereits ausgeprägte Alterungerscheinungen auftreten. Die Messungen nach 300 Betriebsstunden zeigten sehr wenige TE, so dass keine RPDIV-Werte ermittelt werden konnten. Die Ursache hierfür ist nicht bekannt.

Wie bereits erwähnt, sind während der Versuche drei SiC-Inverter ausgefallen, was den Dauertest zum Erliegen brachte. Es besteht die Hoffnung und das Interesse, diese Versuche zu einem späteren Zeitpunkt in einem Folgeprojekt mit einem anderen SiC-Inverter fortzusetzen.



4.8.3 Schlussfolgerungen

Bei dem Siliziumkarbid- und Silizium-Umrichter wurden schnelle Anstiegszeiten im Bereich von 30 bzw. 80 ns gemessen. Mit einem 15 m langen Kabel führte dies bei den getesteten Motoren zu Überspannungen von bis zu 1,1 kV. Für solch kurze Anstiegszeiten macht der Motorenhersteller ABB keine Angaben zu den zulässigen Überspannungen (Abbildung 19). Diverse Literatur belegt jedoch, dass solch kurze Anstiegszeiten einen negativen Einfluss auf die Isolationslebensdauer haben können. Es ist deshalb von grossem Interesse dies zu untersuchen.

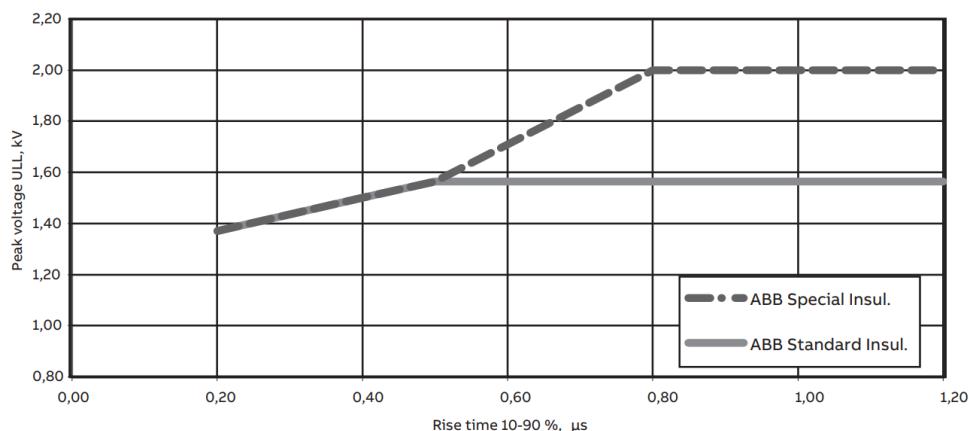


Abbildung 19: Zulässige Phasen-zu-Phasen Spannung in Abhängigkeit der Anstiegszeit an den Anschlussklemmen des Motors.¹⁴

Für die Untersuchung des Isolationszustandes wurden Prüfverfahren nach DIN EN 60034-18-41 angewendet. Es hat sich gezeigt, dass die aus diesen Prüfverfahren ermittelten Werte für PDIV und RPDIV je nach Messkonfiguration stark unterschiedlich sein können. Für die bisher durchgeführten Messreihen nach 0, 50, 100, 200 und 300 Stunden Betriebszeit wurde jeweils eine Vielzahl von Messkonfigurationen verwendet. Anstatt viel Zeit in verschiedene Messkonfigurationen zu investieren, erscheint es für zukünftige Messungen jedoch zielführender, die Messkonfiguration auf eine zu beschränken. Vor teilhafterweise wird hier die Messkonfiguration ausgewählt, die bis jetzt die grössten Effekte gezeigt hat bzw. am meisten Vergleichswerte aus der Literaturstudie aufweist. So können für diese Messkonfiguration mehr Messungen durchgeführt werden, was die Variationen in den Messungen reduzieren sollte. Die Messkonfiguration «Dreieck» ist dafür am geeignetsten.

Bei den Messungen wurde festgestellt, dass sich die TE-Einsetzspannungen der beiden untersuchten Motoren bereits im Neuzustand stark unterscheiden. Dies ist zwar durch Fertigungstoleranzen erkläbar, könnte aber das zukünftige Alterungsverhalten beim Betrieb mit den unterschiedlichen Umrichtern ebenfalls verändern und den Nachweis möglicher Alterungsunterschiede erschweren.

Die repetitive TE-Einsetzspannung für beide Motoren bestimmt durch Impulsspannungsprüfung zeigt wesentlich grössere Variationen als die TE-Einsetzspannung bestimmt durch Stehspannungsprüfung bei Netzfrequenz. Dennoch ist die Impulsprüfung wahrscheinlich besser geeignet, um Alterungsunterschiede nachzuweisen, da die Impulsspannung der Wellenform der Frequenzumrichter viel ähnlicher ist.

Es bestehen noch sehr viele Fragen und Unklarheiten, die zu einem grossen Teil der kurzen Prüfdauer von nur 300 Stunden zugeschrieben werden können. Die kurze Prüfdauer ergab sich daraus, dass während diesen 300 Stunden der Siliziumkarbid Wechselrichter drei Mal kaputt ging. Die Ursache konnte vom Hersteller bisher nicht gefunden werden, weshalb der Test gestoppt werden musste.

¹⁴ Katalog ABB. IEC Low voltage Process performance Aluminum Motors, 11-2023

4.9 Lagerströme

Ströme, die durch die Wälzlager in elektrischen Maschinen fliessen, werden als Lagerströme bezeichnet. Bei netzgespeisten Motoren konnten diese unter anderem durch magnetische Asymmetrien verursacht werden. Durch Verbesserungen in der Fertigung sind diese klassischen Lagerströme nicht mehr von grosser Relevanz. Stattdessen rücken Lagerströme, die durch den Betrieb des Motors mit Frequenzumrichtern entstehen, in den Vordergrund. Zu hohe Lagerströme können die Laufbahn des Lagers aufschmelzen und dadurch das Abrollen des Wälzkörpers beeinflussen. Ebenfalls ist es möglich, dass die Ströme das Lagerfett chemisch zersetzen. Beides führt zu einer reduzierten Lebensdauer des Lagers und zu erhöhten Wartungszyklen der elektrischen Maschine.

4.9.1 Einteilung von Lagerströmen

Es gibt im Wesentlichen vier Arten von Lagerströmen, die durch den PWM-Betrieb von Frequenzumrichtern verursacht werden¹⁵. Der kapazitive dU/dt-Lagerstrom, der EDM-Lagerstrom, die hochfrequenten zirkularen Lagerströme und die Rotor-Erd-Lagerströme. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Kapazitive dU/dt Lagerströme

Der kapazitive Lagerstrom dU/dt entsteht durch parasitäre Kapazitäten in elektrischen Maschinen, die einen kapazitiven Spannungsteiler bilden, so dass ein Teil der Gleichtaktspannung an der Welle anliegt. Die massgeblich beteiligten Kapazitäten sind C_{wr} : Statorwicklung-zu-Rotor-Kapazität, C_{rf} : Rotor-zu-Gehäuse-Kapazität und $C_{b,DE}$ und $C_{b,NDE}$ die Lagerkapazitäten für die Antriebs- und Nichtantriebsseite. Die beteiligten Kapazitäten sind in Abbildung 9 dargestellt.

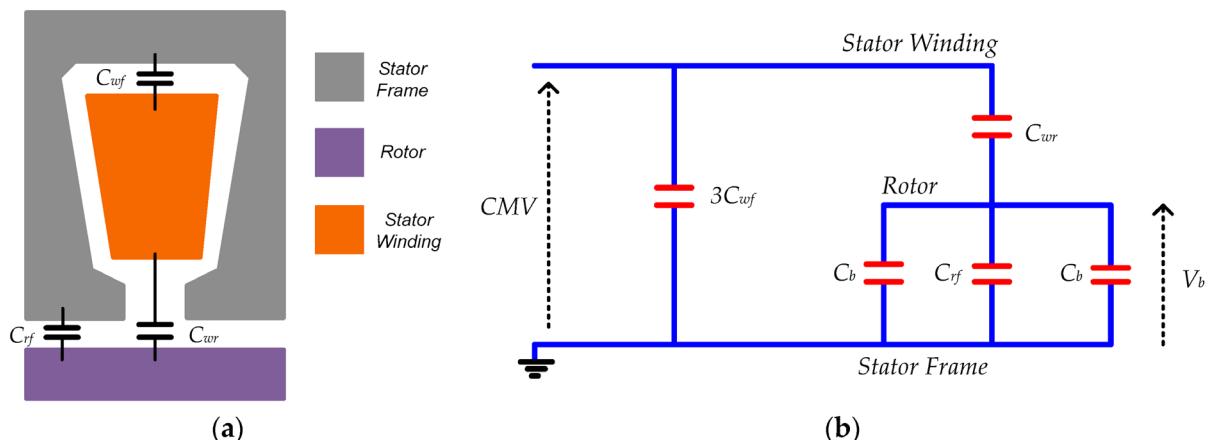


Abbildung 20: Ersatzschaltbild der parasitären Kapazitäten in einer elektrischen Maschine.¹⁶

Unter kapazitiven dU/dt Lagerströmen versteht man die Umladung der Lagerkapazitäten $C_{b,DE}$ und $C_{b,NDE}$. Damit sich eine Lagerkapazität bilden kann, ist ein vollständig isolierender Schmierfilm erforderlich. Dies ist z. B. bei niedrigen Drehzahlen ($< 100 \text{ U/min}$) oder im Stillstand nicht der Fall und das Lager stellt einen metallischen Kontakt und damit einen niederohmigen Widerstand dar. Wenn sich

¹⁵ H. Tischmacher, „Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichtergespeisten Elektromotoren“. Doctoral Thesis. Hannover : Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017

¹⁶ K. B. Tawfiq, M. Güleç, und P. Sergeant, „Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review“, *Machines*, Bd. 11, Nr. 5, Art. Nr. 5, Mai 2023



jedoch ein isolierender Schmierfilm bilden kann, liegt die Spannung über dem Lager typischerweise im Bereich von 1 bis 9% der Gleichtaktspannung¹⁷ und wird wie folgt berechnet:

$$U_b = U_{CM} \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{rf} + C_{b,NDE} + C_{b,DE}}$$

Mit der Gleichtaktspannung U_{CM} berechnet aus dem Mittel der Phasenspannungen U_u , U_v , U_w .

$$U_{CM} = \frac{U_u + U_v + U_w}{3}$$

Jeder Schaltvorgang führt zu einer Spannungsänderung der Gleichtaktspannung, was zu kapazitiven Strömen in den Lagern führt. Diese Ströme sind gering und werden für die Lager und den Schmierstoff nicht als schädlich eingestuft.

EDM-Lagerströme

Die gleiche Spannung, die an den Lagern anliegt und die kapazitiven dU/dt Lagerströme verursacht, ist auch die Ursache für die EDM-Lagerströme (Electric Discharge Machining = Funkenerosion). Im Gegensatz zu den kapazitiven Strömen entstehen EDM-Lagerströme, wenn die anliegende Spannung das Isolationsvermögen des Schmierfilms übersteigt. Die Lagerspannung U_b baut sich zunächst bis zu einem Maximalwert auf, der durch die Isolationseigenschaften des Schmierstoffes wie Zusammensetzung, Schmierfilmdicke, Temperatur usw. gegeben ist. Danach fällt die Spannung schlagartig auf Null ab. Die Kapazitäten C_b und C_{rf} entladen sich und es bildet sich ein kurzer Entladestromimpuls, der bis zu einem Maximalwert von einigen Ampere ansteigen kann und dann ausschwingt. Nach der Entladung wirkt das Lager wieder isolierend, so dass sich wieder eine Lagerspannung aufbauen kann. Ein typischen EDM-Lagerstrom zeigt Abbildung 21.

Diese Art von Lagerströmen zeichnet sich durch kurze und hohe Stromimpulse aus. Die Entladungen haben genügend Energie, um die Laufbahn des Lagers lokal aufzuschmelzen oder sogar zu verdampfen. Deshalb werden sie im Allgemeinen als schädlich für Wälzlager angesehen. Das Auftreten, die Häufigkeit und die Intensität der Ströme ist jedoch stark von den Betriebsbedingungen (Drehzahl, verwendete Schmiermittel, Temperatur, usw.) des Motors abhängig.

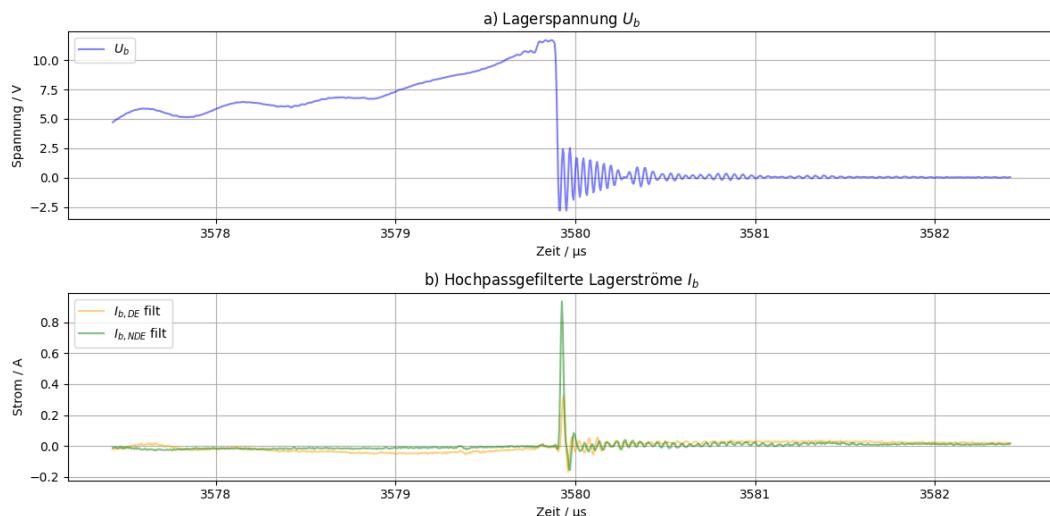


Abbildung 21: Typischer Verlauf der Lagerspannung und des Lagerstroms beim Auftreten von Entladelagerströmen (EDM-Lagerströmen).

¹⁷ M. Weicker, „Gleichtakteffekte bei umrichtergespeisten Elektromotoren“, Ph.D. Thesis, Technische Universität, Darmstadt, 2021. doi: 10.26083/tuprints-00019145



Hochfrequente Zirkular Lagerströme

Bei jedem Schaltvorgang fliesst aufgrund der parasitären Kapazität von Wicklung-zu-Statorblechpaket, in Abbildung 9 als C_{wf} bezeichnet, ein Strom durch das Motorgehäuse, der dann über die Erdungs- oder Schirmleitung abgeleitet wird. Dieser hochfrequente Strom erzeugt einen zirkularen magnetischen Fluss, der die Motorwelle umgibt. Die durch diesen Fluss in der Motorwelle induzierte Spannung führt zu einem hochfrequenten Kreisstrom, der sich über die Strecke Blechpaket, Lagerschilde, Motorlager, Welle schliesst.

Die Kapazität C_{wf} verhält sich proportional zu Motorengrösse. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit zirkulare Lagerströme insbesondere bei Motoren mit mehr als 100 kW Leistung als kritisch angesehen. Durch die deutlich schnelleren Anstiegszeiten können aber auch schon kleinere Kapazitäten zu grossen Strömen führen, weshalb sie auch für kleinere Motoren wieder relevant sind und untersucht werden sollten.

Rotor-Erd-Lagerströme

Unter normalen Bedingungen wird der grösste Teil des Stroms, der über die Kapazität zwischen der Wicklung und dem Statorblechpaket in das Gehäuse eingekoppelt wird, über das Erdungskabel (oder den Schirm) zum Wechselrichter zurückgeführt. Wenn jedoch die Last geerdet ist und ein Pfad mit niedrigerer Impedanz über die Lagerschilde, durch die Lager, zur Last und zur Erde besteht, kann ein grosser sogenannter Rotor-Erdstrom fliessen. Diese Ströme sind nicht nur für die Lager des Motors, sondern insbesondere auch für die Lager der angetriebenen Last schädlich. Durch eine isolierte Kupplung und eine gute Erdung können diese Ströme weitgehend reduziert werden.

Allen genannten Lagerstromarten liegt am Anfang der Wirkungskette eine parasitäre kapazitive Kopplung zugrunde. Da der Strom über eine Kapazität von der Geschwindigkeit der Spannungsänderung abhängt, ist davon auszugehen, dass Frequenzumrichter mit schnelleren Anstiegszeiten höhere Lagerströme verursachen.

4.9.2 Literaturstudie

Im Folgenden werden die Resultate aus drei Studien vorgestellt, die explizit Lagerströme bei Verwendung von SiC basierten Wechselrichtern untersuchten.

In ¹⁸ wurden die Lagerströme eines 5 PS (3,7 kW) Motors einmal mit SiC Umrichter (48-50 ns Anstiegszeit) und ein Si IGBT Inverter (190 ns Anstiegszeit) gemessen und verglichen. In ihren Experimenten erhöhte sich sowohl die maximale Lagerspannung wie auch die gemessenen Lagerströme und deren Auftrittshäufigkeit deutlich unter Verwendung des SiC Wechselrichters. Lagerströme traten in der Regel erst auf, wenn der Motor 10 bis 20 Minuten gelaufen war, vorher war der Schmierfilm im Lager zu dick, weil die Lager noch kalt waren. Die Autoren diskutierten und untersuchten ausschliesslich EDM-Lagerströme.

In ¹⁹ wurden von denselben Autoren eine ausführlichere Untersuchung veröffentlicht, in der die Lagerstrommessungen durch ein elektrisches Modell und statistische Auswertungen erweitert wurden. Insbesondere der Einfluss der Temperatur wurde in den Messungen untersucht. Dabei stellten Sie fest, dass bei geringer Temperatur (unterhalb 30 °C) EDM-Ströme selten auftreten.

Die Amplitude der Lagerströme und Lagerspannungen erreichte für beide Umrichter bei 37 °C Temperatur das Maximum und fielen beim SiC Wechselrichter leicht grösser aus. Bei noch höheren Temperaturen reduzierten sie sich für beide Inverter, jedoch nicht gleich stark. Der SiC Wechselrichter zeigte

¹⁸ A. von Jouanne et al., "Motor Bearing Current Characterization in SiC- based Variable Frequency Drive Applications," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 2718-2725

¹⁹ R. Collin, A. Yokochi and A. v. Jouanne, "Novel Characterization of Si- and SiC-based PWM Inverter Bearing Currents Using Probability Density Functions," 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 5146-5153



grössere Amplituden bei Temperaturen ab 50 °C bis 60 °C. Die Autoren schlossen daraus, dass SiC Wechselrichter besonders bei Motoren die nahe an Ihrer Maximallast laufen und sich deshalb stärker erwärmen, durch SiC Wechselrichter stärker belastet werden als mit Si-Umrichter.

In ²⁰ wurden die Lagerströme einer 7,5 kW Induktionsmaschine gemessen, die mit einem SiC Wechselrichter betrieben wurde. Dabei wurde der Einfluss diverser Parameter wie Anstiegszeit, PWM-Frequenz, Zwischenkreisspannung und Lagertemperatur untersucht. In der Arbeit wurde festgestellt, dass die dU/dt Lagerströme mit steigender Anstiegszeit zwar stark zunehmen, die Anzahl (pro Zeiteinheit) an besonders schädlichen EDM-Lagerströmen jedoch unverändert bleibt. Einen deutlich grösseren Einfluss auf die Anzahl EDM-Ströme hat die PWM-Frequenz (linearer anstieg bis 60 kHz, dann Reduzierung), Zwischenkreisspannung (exponentieller Anstieg) sowie Temperatur (wenig EDM bis 25 °C, starke Zunahme bei 35 °C). Zuletzt hatte auch die Drehzahl einen starken Einfluss auf die Anzahl EDM Lagerströme mit einer grossen Anzahl bei 150 U/min und einer starken Abnahme deren Häufigkeit bei höheren Geschwindigkeiten.

4.9.3 Eigene Messresultate

Die Ergebnisse der Lagerstrommessung zeigen deutliche Merkmale, die nicht spezifisch auf den verwendeten Wechselrichter, sondern allgemein auf die Messeinrichtung, den Motor und die verbauten Lager zurückzuführen sind. Daher wird zunächst eine vollständige Interpretation der Messergebnisse für eine Messung bei Betrieb mit dem Lenze i550 (Si-basierten) Umrichter gegeben. Erst danach wird auf die spezifischen Unterschiede eingegangen, die sich durch die verschiedenen Wechselrichter ergeben.

Betrieb bei Nenndrehzahl

Abbildung 11 a) zeigt die Lagerströme auf der Antriebsseite (Drive End, DE) und Nicht-Antriebsseite (Non-Drive End, NDE) bei Betrieb des Motors mit 50 Hz unter Verwendung des Lenze Frequenzumrichters ohne Last. Die Lagerstrommessungen beider Lager sind von einem grossen Signal mit der Grundfrequenz des Motors (50 Hz, 20 ms Periodendauer) überlagert. Dieses Signal stellt ein Störsignal dar und ist nicht durch einen realen Stromfluss in der Welle oder den Lagern zu erklären. Es entsteht durch eingekoppelte Felder, hervorgerufen durch Ströme in der Motorenwicklung, welche sich in sehr kleiner Distanz zu den Rogowski-Spulen befinden. Aus diesem Grund wird in den folgenden Abbildungen meist eine hochpassgefilterte Version der Lagerströme gezeigt, die in Abbildung 11 b) dargestellt und mit dem Suffix «filt» gekennzeichnet ist. Das hochpassgefilterte Signal zeigt bei $I_{b,DE}$ ein hochfrequentes Signal mit einer Amplitude von ca. 0.1 A_p mit vereinzelten Peaks bis 0.2 A_p. $I_{b,NDE}$ zeigt eine etwas grössere Signalamplitude, jedoch keine Strompeaks.

²⁰ Y. Xu, Y. Liang, X. Yuan, X. Wu and Y. Li, "Experimental Assessment of High Frequency Bearing Currents in an Induction Motor Driven by a SiC Inverter," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 40540-40549, 2021

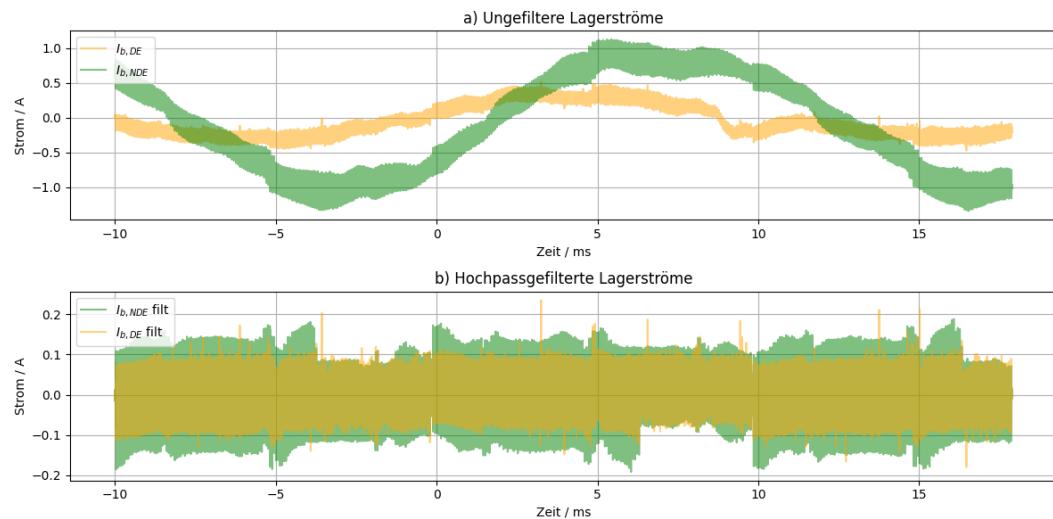


Abbildung 22 : Die Messungen des Rogowski Spulen sind überlagert von einem Störsignal (a). Durch Hochpassfiltern ist es möglich den realen Lagerstrom zu messen (b).

In Abbildung 23 sind nun die Lagerspannung und die Gleichtaktspannung in a) und die gefilterten Lagerströme in b) dargestellt. Die Gleichtaktspannung ist wegen der hohen Schaltfrequenz von 16 kHz und den langen Zuleitungen zum Motor, welches zu Reflektionen und Überlagerungen führt, nicht in diskreten Stufen (-Udc, -1/3 Udc, 1/3 Udc, ...) messbar, sondern stark geglättet. Die Lagerspannung beträgt die meiste Zeit 0 V. Bei jedem Schaltvorgang treten jedoch Oszillationen auf. Diese sind auch in den Lagerströmen ersichtlich.

Gelegentlich kann man beobachten, dass die Lagerspannung der Gleichtaktspannung «folgt». Dies ist der Zustand, in dem der Schmierfilm isolierend wirkt und der in Kapitel 5.3.1 beschriebene kapazitive Spannungsteiler einen Teil der Gleichtaktspannung auf die Welle überträgt. Diese Spannung bricht jedoch bereits bei kleinen Lagerspannungen ein und das Lager geht in einen ohmschen Zustand über. Dieses Durchbrechen der Isolationseigenschaft des Schmierfilms kann vereinzelt zu kleinen Stromspitzen (EDM-Ströme) führen, wie sie z. B. in Abbildung 12 bei ca. 0.05 ms auftreten. Aufgrund der geringen Durchbruchspannung ist die gespeicherte Energie jedoch sehr gering und der resultierende EDM-Strom ebenfalls sehr klein, in der Regel sogar deutlich kleiner als die während der Schaltzyklen auftretenden Ströme. Diese geringen EDM-Ströme werden in der Literatur und bisherigen Messresultaten anderer Autoren somit nicht als schädlich angesehen.

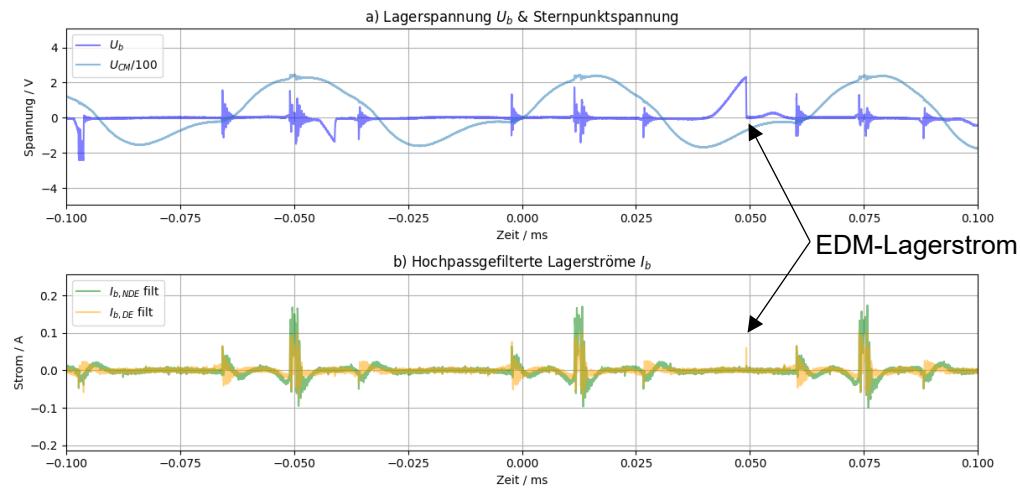


Abbildung 23 : Verlauf der Gleichtaktspannung und Lagerspannung in a) und der gefilterten lagerströme in b).

Diese Beobachtungen fügen sich in das in Abbildung 13 vorgestellte Klassifizierungsschema aus²¹ ein. Nach dieser Einteilung, die in Abbildung 20 dargestellt ist, sind die Messungen grösstenteils dem Bereich «C: Resitive Currents / No EDMs» zuzuordnen. Hier ist der Schmierfilm aufgrund der erhöhten Temperatur und schnellen Drehzahl im Betrieb so dünn, dass im Lager entweder metallischer Kontakt entsteht oder die Spannungsamplituden sind jeweils so gross, dass die Isolierung durch den Schmierfilm keine Rolle mehr spielt. Dies ist nach verschiedenen Arbeiten auch der zu erwartende Effekt, wenn leitfähige Fette eingesetzt werden. Gemäss Absprache mit dem Motorenhersteller ABB werden beim untersuchten Motor jedoch keine leitfähigen Fette verwendet.

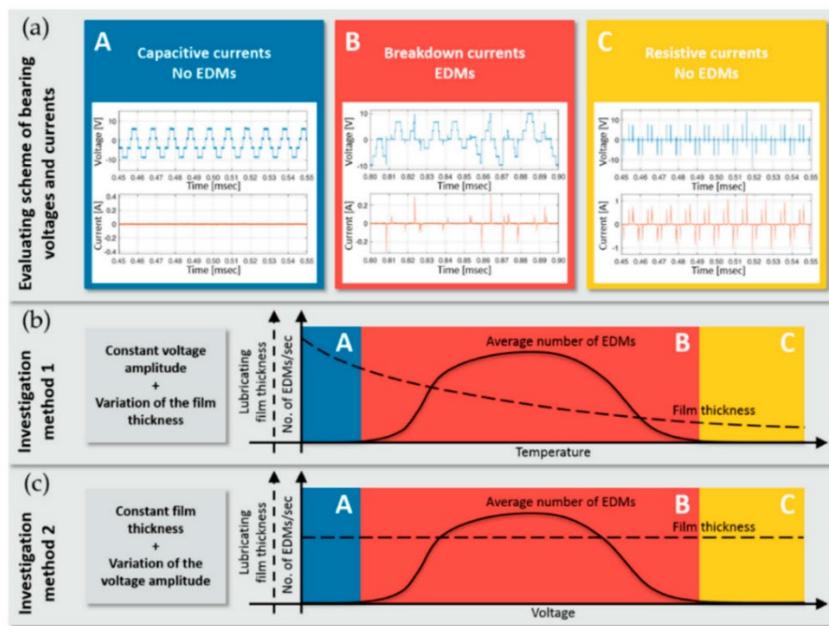


Abbildung 24 : Einteilung der Lagerströme in drei Typen. Die Unterschiede ergeben sich in erster Linie aus den Isolationseigenschaften des Schmierfilms, die von seiner Dicke (Temperatur, Drehzahl) abhängen.

²¹ Puchtler, Steffen, Robert Maier, Martin Kuhn, and Yves Burkhardt. 2024. "The Influence of Load and Speed on the Initial Breakdown of Rolling Bearings Exposed to Electrical Currents" *Lubricants* 12, no. 1: 1.



Spezialfall: Kalte Lager

Eine deutliche Erhöhung der Anzahl an Entladungen und EDM-Stromintensität konnte bei Starten eines Motors, der sich bei Raumtemperatur befindet, oder bei Beschleunigungsvorgängen des Rotors beobachtet werden. Dabei konnten beispielsweise in der Messung gezeigt in Abbildung 14 in einem Zeitraum von 10 ms, 10 Strompeaks mit einer Amplitude von grösser als 0.5 A festgestellt werden. Dies lässt sich damit erklären, dass der Schmierfilm durch die reduzierte Temperatur dicker ist und die Spannung bis zum Durchbruch somit deutlich höher ansteigen kann. Die Lagerspannung erreichte dabei Werte von 12 V und der EDM-Strom 1.25 A. Die Zunahme von EDM-Strömen bei kaltem Motor gilt sowohl für Wechselrichter mit Silizium und Siliziumkarbid Endstufe. Bereits nach 15 Minuten bei Nenn-drehzahl waren EDM-Ströme jedoch sehr selten und deren Amplitude deutlich unter 0.5 A. Ein Motor der dauerhaft bei kalten Temperaturen eingesetzt wird oder ein Motor der vielen Start-Stop-Zyklen unterliegt erfährt somit eine deutlich grössere Belastung der Lager aufgrund von EDM-Strömen als ein Motor der bei Raumtemperatur und konstanter Geschwindigkeit und Last betrieben wird.

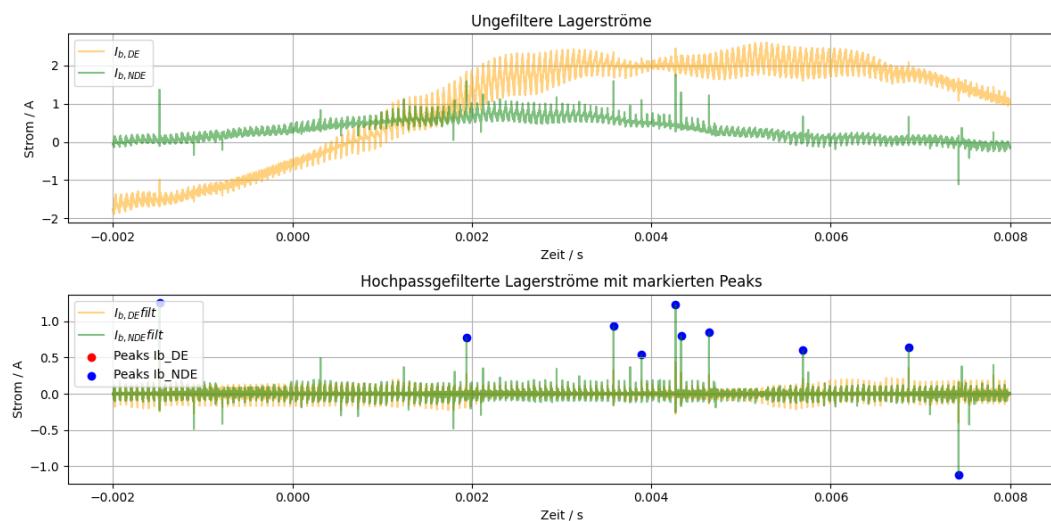


Abbildung 25 : Lagerströme bei Temperaturen von ca. 25 °C. Bei diesen Temperaturen ist der Schmierfilm dicker und ein Spannungsaufbau über dem Lager ist möglich. Die Folge sind hohe EDM-Lagerströme.

Spezialfall: Niedrige Drehzahlen

Besonders hohe Lagerströme wurden bei niedrigen Drehzahlen von 0 bis 100 U/min festgestellt. Abbildung 15 zeigt die Lagerspannung und eine der Phasenspannungen in a) und die Lagerströme und den Erdstrom in b) für den Betrieb mit dem Lenze-Wechselrichter bei 60 U/min. Bei diesen kleinen Drehzahlen und ohne Last ist der Modulationsindex sehr gering und die Phasen schalten beinahe gleichzeitig. Dies führt zu grossen Gleichtaktströmen (Stator-Erdstrom I_{sg}) von bis zu 10 A_p. Zusätzlich macht das Lager bei geringen Drehzahlen metallischen Kontakt, da die Kugeln nicht auf einem Schmierfilm aufliegen. Dies führt zusammen zu sehr grossen Zirkularströmen von rund 2 A_p. Da jedoch ein guter Ohm'scher Kontakt besteht und die Kontaktfläche bei niedrigen Drehzahlen grösser ist, wird derzeit davon ausgegangen, dass diese Lagerströme nicht schädlich sind.

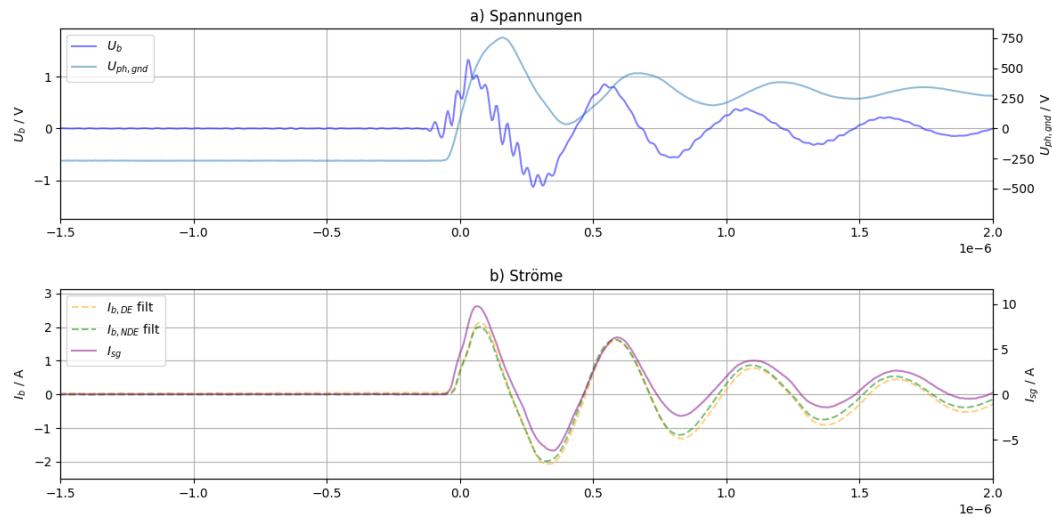


Abbildung 26 : Lägerströme bei einer Drehzahl von 60 U/min unter Verwendung des Lenze Inverters

Bei Verwendung des LARA-100k Wechselrichters (Abbildung 16) wurden bei niedrigen Drehzahlen Erdströme von bis zu 22 A_p gemessen, also mehr als das Doppelte im Vergleich zum Lenze Inverter. Dies ist aufgrund der durch den Motor gegebenen konstanten Statorwicklungs-Blechpaket-Kapazität C_{wf} und der erhöhten Anstiegsrate von $18 \text{ kV}/\mu\text{s}$ statt ca. $7 \text{ kV}/\mu\text{s}$ auch zu erwarten. Diese höheren Erdströme führen folglich auch zu stark erhöhten Kreisströmen von 5 A_p .

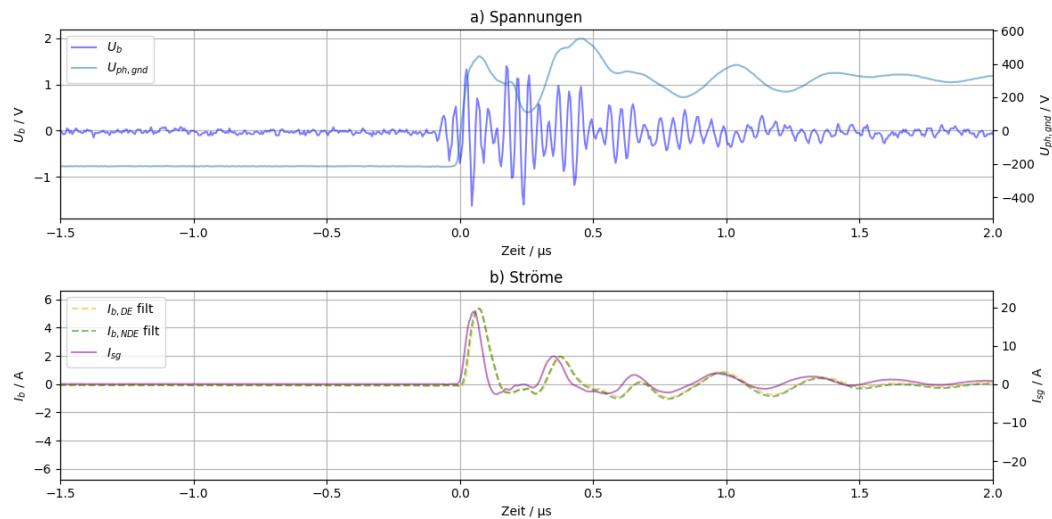


Abbildung 27 : Lägerströme im Stillstand unter Verwendung des LARA-100k Inverters

Ströme während Schaltzyklen bei Nenndrehzahl

Bei Nenndrehzahl und Betriebstemperatur zeigte der untersuchte Motor weder ein Abbild der Gleichtaktspannung als Lagerspannung noch grössere EDM-Ströme. Stattdessen befinden sich die Lager in einem Ohm'schen Zustand. Nach Abbildung 17, in dem unterschiedliches Lagerstromverhalten nach Temperatur und Schmierfilmdicke eingeteilt wird, verhält sich der getestete Motor im «Normalzustand» somit sowohl beim Betrieb mit dem LARA-100k wie auch dem Lenze Wechselrichter nach «Zustand 5».

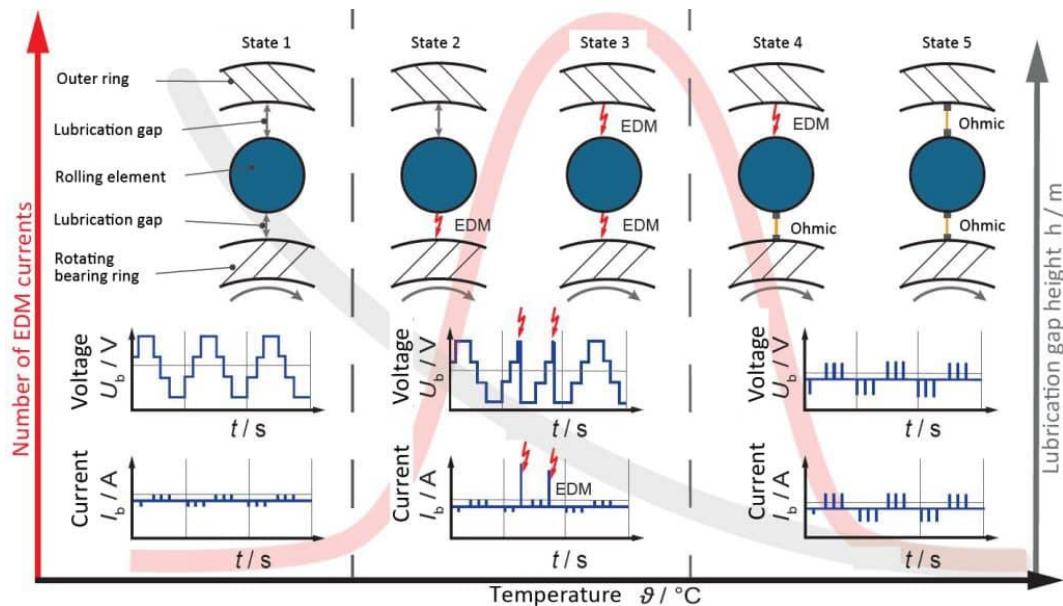


Abbildung 28 : Einteilung des Lagerstromverhaltens nach Temperatur und Schmierfilmdicke.²²

Die Lagerspannung sowie die Lagerströme zeichnen sich in diesem Zustand durch geringe Peaks aus, die bei jedem Schaltvorgang auftreten. Während diese Peaks zwar eher klein sind, konnte eine deutliche Zunahme deren Amplitude bei Betrieb mit dem SiC im Vergleich zum Si Wechselrichter festgestellt werden. Ein Vergleich ist in Abbildung 29 dargestellt. Bild a) und c) sind Messungen mit dem Lenze Wechselrichter und c) und d) Messungen mit dem LARA-100k Wechselrichter.

Beim Lenze Wechselrichter ist die Anzahl an Peaks geringer, weil der Wechselrichter bei 50 Hz Übermodulation verwendet und deshalb eine der Phasen für eine gewisse Zeit nicht mehr schaltet, sondern konstant auf $+V_{dc}$ oder $-V_{dc}$ verbleibt. Die maximale Amplitude der Lagerströme unterscheidet sich ca. um den Faktor 2. Der schädigende Einfluss auf die Lager dürfte jedoch nicht nur mit der maximalen Amplitude, sondern auch mit der Häufigkeit des Auftretens zusammenhängen. Somit dürfte der SiC-Umrichter der mehr Schaltvorgänge und konstant deutlich höhere Lagerstromamplituden aufweist sich deutlich schlechter auf die Lagerlebensdauer auswirken.

Der treibende Mechanismus für diese Lagerströme ist der Stator-Erdstrom I_{sg} welcher die zirkulären Lagerströme verursacht, identisch zum zuvor diskutierten Spezialfall der niedrigen Drehzahlen. Im Vergleich zu niedrigen Drehzahlen reduziert sich der Stator-Erdstrom bei Nenndrehzahl deutlich, da dann der Modulationsindex steigt und die Gleichtaktströme sich nicht addierend überlagern. Der Stator-Erdstrom beim SiC Wechselrichter bleibt jedoch unabhängig von der Drehzahl höher als beim Si Wechselrichter und verursacht damit höhere Zirkularströme.

²² <https://flucon.de/en/fluid-lexicon/breakdown-currents-in-rolling-bearings/>

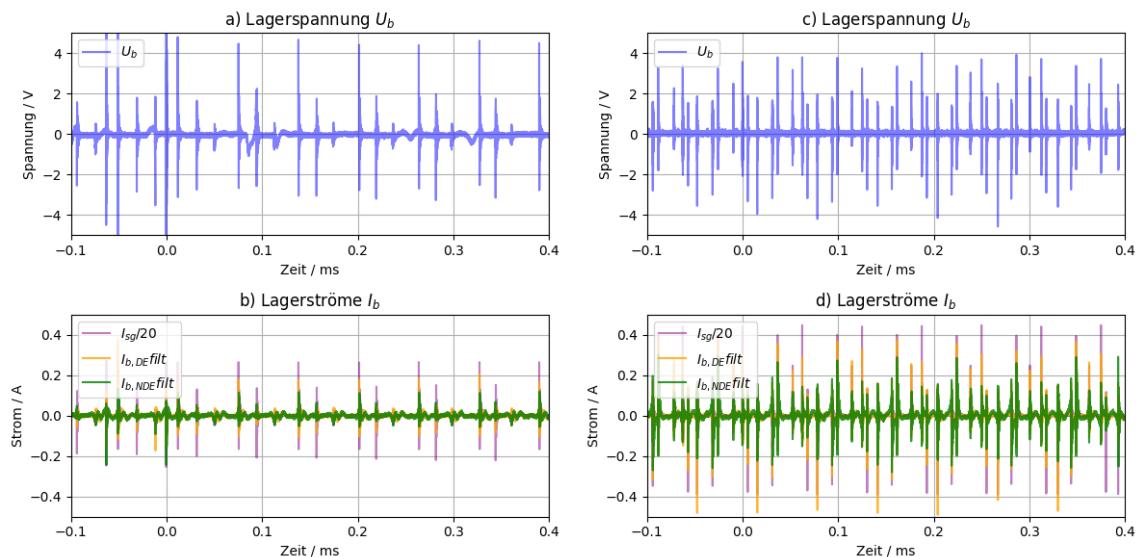


Abbildung 29 : Vergleich der Lagerspannungen und Lagerströmen zwischen Si in a) und b) und SiC in c) und d). Der Motor wurde jeweils bei 50 Hz und ohne Last betrieben und hat sich auf Betriebstemperatur erwärmt.

4.9.4 Schlussfolgerungen

Die oftmals als am schädlichsten der drei Lagerströmen eingestuften EDM-Lagerströme traten in der untersuchten Maschine bei Nenndrehzahl und unter Betriebstemperatur nicht auf. Unabhängig davon, ob der Motor mit dem Si oder SiC Wechselrichter gespeist wurde. Stattdessen befanden sich die Lager in einem ohmschen Zustand, der durch eine sehr geringe Schmierfilmdicke gekennzeichnet ist. In diesem Zustand entstehen bei jedem Schaltvorgang Lagerströme, es kommt jedoch zu keinem Spannungsaufbau über den Lagern welches eine Grundvoraussetzung für das Auftreten von EDM-Strömen darstellt.

Es gab vereinzelt Anzeichen, dass die schnelle Anstiegszeit der Gleichtaktspannung eher zu einem Durchbruch des Schmierfilmes führt und so ein Aufbau der Lagerspannung unterbindet. Die schnelleren Anstiegszeiten und erhöhten Schaltfrequenzen von SiC Wechselrichtern könnten somit sogar von Vorteil sein, sofern nur EDM-Lagerströme betrachtet werden.

Ein unvermeidbarer Effekt von schnelleren Anstiegsgeschwindigkeiten ist jedoch eine Erhöhung von Gleichtaktströmen. Diese im Normalzustand über das Motorengehäuse und Erdkabel (Schirm) abgeleiteten Ströme verursachen hochfrequente Zirkularströme, welche beim SiC Wechselrichter deutlich ausgeprägter sind als beim Si Frequenzumrichter. Ob die gemessenen Ströme jedoch bereits in der Lage sind Lagerschäden hervorzurufen müsste durch einen längeren Test und anschliessende Untersuchungen der Lager geprüft werden.

Sicherlich von grosser Wichtigkeit ist eine Erdung mit niedriger Impedanz, damit die Gleichtaktströme nicht zu schädlichen Rotor-Erdströmen werden, welche sowohl das Lager des Motors aber auch die der Last zusätzlich belasten würden. Während dies generell für alle Wechselrichter gilt, wurde je nach Betriebszustand mehr als eine Verdopplung der Gleichtaktströme zwischen Si und SiC gemessen weshalb bei Wahl des Kabels und des Erdungskonzepts bei SiC Wechselrichtern gespeisten Motoren besondere Sorgfalt geboten ist.

Nicht geprüft während dieser Untersuchung wurden die verschiedenen Methoden zur Reduzierung der Lagerströme wie isolierte Lager, Gleichtaktdrosseln oder Schaft-Erdungsbürsten. Es ist jedoch zu erwarten, dass bereits bewährte Konzepte auf für SiC-Wechselrichter angewendet werden können.

Diese Ergebnisse, insbesondere das Verhalten der EDM-Ströme, weichen von der diskutierten Literatur ab, lassen sich aber mit den gezeigten Einteilungsschemen von EDM-Strömen erklären. Während



die in der Literatur diskutierten Motoren bei Raumtemperatur im Bereich «Capacitive Currents / No EDM» liegen, befindet sich der von uns untersuchte Motor bei Raumtemperatur im gefährdeten Bereich, in dem EDM-Ströme auftreten. Steigt die Temperatur, wird der Schmierfilm dünner und beide Motoren gehen jeweils in den nächsten Bereich über. Dies zeigt, dass Lagerströme vom untersuchten Motor, den verwendeten Lagern, Schmiermitteln und der Temperatur abhängt und eine Untersuchung des Umrichters allein nicht ausreicht.

4.10 Wide Bandgap Power Semiconductor Industrial Inverter Research Roadmap 2024-2027

Im Workshop vom 15. Mai 2024 wurden folgenden Themen für die Research Roadmap identifiziert:

- Hohe Initialkosten
 - Kostenvergleich auf Komponentenebene mit geschätzten Produktionskosten.
 - Kostenvergleich auf Systemebene anhand von TCO für verschiedene Nutzungszyklen.
 - Kostenvergleich auf ganzheitlicher Ebene unter Verwendung von LCA für Umweltauswirkungen und Kreislaufwirtschaft.
- Anwendungsreife
 - Das Thema muss mit PECTA abgestimmt werden. Die jährlichen Berichte von PECTA werden in das Weissbuch aufgenommen. Die wichtigsten Beiträge werden sich mit folgenden Themen befassen
 - Produktionskapazität und Verfügbarkeit
 - Herausforderungen in der Lieferkette
- Entwurf und Umsetzung: Topologien
 - Vergleich von Multilevel-Topologien mit WBG-Leistungshalbleitern mit konventionellen Si-basierten 2-Level-Wechselrichtern in Bezug auf Wirkungsgrad und Volumen.
 - Potenzial alternativer Topologien, die durch WBG-Leistungshalbleiter ermöglicht werden (Strom-DC-Link-Wandler, Multilevel-Wechselrichter mit fliegendem Kondensator, sparse neutral-point-clamped inverters usw.) mit Schwerpunkt auf Effizienz und Leistung.
- Entwurf und Umsetzung: Hilfseinrichtungen
 - Dieses Thema wurde fallen gelassen, da es nicht als so grundlegend wie das Thema „Topologien“ und nicht als so anwendungsbezogen (d. h. benutzerorientiert) wie die Themen „Betriebsparameter“ und „Filter“ angesehen wurde. Die Betrachtung neuartiger Gate-Treiber- oder Stromversorgungs-Topologien wurde als zu detailliert und nicht als Kern des White Book-Inhalts angesehen.
- Entwurf und Implementierung: Filter
 - Besondere Überlegungen zum Design und zur korrekten Dimensionierung von Eingangsfilters für Multilevel-GaN-basierte aktive Frontends.
 - Anforderungen und Leistung von Vollsinus-Ausgangsfilters und motorseitigen EMI-Filtern (Strahlungsemision).
 - Aktive vs. passive und hybride dv/dt-Begrenzungskonzepte im Hinblick auf den Wechselrichterwirkungsgrad



- Entwurf und Implementierung: Betriebsparameter
 - Optimierung der Betriebsparameter für einen optimalen Wirkungsgrad, einschliesslich Standardtopologie, Multilevel-Topologie und Topologie mit zwei offenen Wicklungen, basierend auf software- und hardwarebezogenen Parametern wie Schaltfrequenz, Schaltgeschwindigkeit, Filterdimensionierung und Temperaturverhalten.
 - Effekte wie dynamischer Durchlasswiderstand in GaN oder restliche Soft-Switching-Verluste in SiC usw.
- Aspekte der Zuverlässigkeit und Langlebigkeit
 - Stand der Technik bei der Vorhersage der MTBF für WBG-Leistungshalbleiter und Vergleich (Leistungszyklen) zwischen WBG- und IGBT-Leistungshalbleitern.
 - Fortschritte bei der Modellierung der Zuverlässigkeit von WBG-Leistungshalbleitern.
 - Standardtechnologien zur thermischen Optimierung, z.B. Z_{th} -Charakterisierung von WBG-Leistungshalbleitern, einschliesslich der thermischen Kreuzkopplung zwischen den Halbleiterchips in einem Modul.
 - Fortgeschrittene thermische Optimierung auf der Grundlage höherer Genauigkeit bei der thermischen Überwachung, z. B. Online-Überwachung der Sperrsichttemperatur über Lichtwellenleiter oder Gate-Treiber.
- Risiken/Anforderungen an die Ausrüstung
 - Auswirkungen von WBG-Industriemrichtern auf Lager und Isolierung
 - Auswirkungen von WBG-Industriemrichtern auf die EMV-Prüfung und EMV-Massnahmen
 - Erhöhte Genauigkeit der Messgeräte für die Prüfung von WBG-Wechselrichtern

Die Grafik auf der nächsten Seite fasst die Forschungsthemen und Schlüsselwörter der verschiedenen Aspekte zusammen und veranschaulicht sie.



Wide Bandgap Industrial Inverter Research Roadmap 2024-2027

Research Questions

Themes

- RQ1: Application Readiness**
- Cost comparison on component level
 - Cost comparison on system level
 - Cost comparison on holistic level
 - Production capacity and availability
 - Supply chain challenges

- RQ2: Design and Implementation**
- Comparison of WBG multilevel topologies
 - Potential of alternative topologies
 - Requirements and design of input and output filter design and topologies
 - Operational parameter optimization for optimal efficiency

- RQ3: Reliability and Durability**
- State of the art prediction of MTBF
 - Methods for WBG Reliability and Duration Testing
 - Advances in modelling of WBG power semiconductor
 - Standard and advanced thermal optimization technologies for WBG power semiconductors

- RQ4: Risks to Equipment**
- Impact on bearings and insulation aging
 - Impact on EMC Testing and EMC measures
 - Increased measurement equipment accuracy for WBG inverter testing



Abbildung 30 : WBG industrial inverter research roadmap.



4.11 Schlussfolgerungen

- Silizium-Karbid-Wechselrichter können den Gesamtwirkungsgrad durch höhere Schaltgeschwindigkeiten und damit geringere Motorverluste erhöhen. Dazu ist es jedoch notwendig, die Schaltfrequenz auf den Motor abzustimmen. Zu hohe Schaltfrequenzen führen zu einer Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades.
- Höhere Schaltfrequenzen ermöglichen kleinere Ein- und Ausgangsfilter beim Umrichter mit gleichzeitig geringeren Verlusten. Somit sind kompakte Umrichter mit hohem Wirkungsgrad möglich.
- Die schnellen Anstiegszeiten von SiC-Umrichtern führen zu Überspannungen am Motor. Dies ist insbesondere beim Austausch von Frequenzumrichtern an älteren Motoren zu beachten, deren Isolationssystem dafür nicht ausgelegt ist. Eine Erhöhung der Lagerströme konnte ebenfalls festgestellt werden, ob diese jedoch schädlich sind, hängt stark von den verwendeten Lagern und der Einsatztemperatur ab. Eine generelle Aussage ist nicht möglich.
- Für die Periode 2024-2027 wurden 4 Forschungsbereiche identifiziert und dazugehörige Forschungsfragen definiert. Adressiert werden die Bereiche Technische Reife und Verfügbarkeit, Design und Umsetzung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie die Risiken für weitere Ausrüstung.

4.12 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Der Langzeitversuch zum Vergleich der Isolationsalterung konnte aufgrund von Problemen mit dem SiC-Frequenzumrichter noch nicht abgeschlossen werden. Mit dem Aufbau einer Versuchsanlage und den entwickelten Messmethoden wurde eine Basis geschaffen, die es ermöglichen sollte, mögliche Unterschiede in der Isolationsalterung, sofern vorhanden, nachzuweisen. Es wäre daher wünschenswert, in einem separaten Folgeprojekt den Langzeitversuch mit einem anderen SiC-Umrichter fortzusetzen.



5 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Insgesamt wurden für die Zusammenarbeit in den nationalen und internationalen IEC-Gremien rund 30 Arbeitstage aufgewendet.

5.1 Nationale Zusammenarbeit

An folgenden nationalen Meetings wurde teilgenommen:

- Nationales IEC-Meeting bei electrosuisse, (01. 12. 2022), Fehrlitorf, Switzerland
- BFE Trendwatching Group Meeting (07. 06. 2023), Baden, Switzerland
- INCITE Forum, BFE Energie Schweiz (28.11.2023), Bern, Switzerland
- TK2 and TK22 National Committee Meeting (10. 11. 2023), Baden, Switzerland
- BFE Trendwatching Group Meeting (21. 03. 2024), Sion, Switzerland
- forum de l'Agence de l'énergie (22. 11. 2024), Biel/Bienne, Switzerland
- TK2 and TK22 National Committee Meeting (2024-12-30), Fehrlitorf, Switzerland

5.2 Internationale Zusammenarbeit

An folgenden internationalen Meetings wurde teilgenommen:

Reine Online-Meetings aufgrund Covid-Reisebeschränkung:

- WebEx Meeting IEC SC 22G WG18 2020-01-20
- IEC SC 22G WG18 2020-03-18 Zoom Meeting
- Meeting IEC SC 22G WG18 2020-03-19 Zoom
- CAISEMS 2020-03-27 Zoom Meeting
- IEC ACEE 2020-04-08 Zoom Meeting
- IEC SC 22G WG18 2020-04-14 Zoom Meeting
- IEC SC 22G WG18 2020-04-20 Zoom Meeting
- EMSA 2020-05-05 Zoom Meeting
- IEC TC2 W28 2020-05-11 Zoom Meeting
- IEC TC2 WG31 2020-05-12 Zoom Meeting
- IEC TC2 WG12 2020-05-14/15 Zoom Meeting
- SC22G WG18 (CD Development) 2020-05-18 Zoom Meeting
- WG18 (CD Development) 2020-06-22 Zoom Meeting SC22G
- SC22G WG18 (CD Development) 2020-07-23 Zoom Meeting
- CAISEMS 2020-09-08 Zoom Meeting
- IEC ACEE 2020-09-16 Zoom Meeting
- EMSA 2020-10-26 Zoom Meeting
- TC2 WG 12 2020-11-12 Zoom Meeting
- TC2 WG 31 2020-11-13 Zoom Meeting
- CAISEMS Workshop 2020-11-18 Zoom Meeting



- CENELEC TC22X 2020-12-14 Zoom Meeting
- SC22G WG18 Session 1, 20.01.2021
- SC22G WG18 Session 2, 27.01.2021
- SC22G WG18 Session 3, 03.02.2021
- SC22G WG18 Session 4, 08.02.2021
- SC22G WG18 Session 5, 22.02.2021
- SC22G WG18 Session 6, 08.03.2021
- SC22G WG18 Session 7, 16.03.2021
- SC22G WG18 Session 8, 18.03.2021
- SC22G WG18 Session 9, 22.03.2021
- 5th CAISEMS Meeting - Zoom Meeting, 30.03.2021.
- EMSA Meeting – Zoom, 12.04.2021.
- SC22G WG18 Session 10, 19.04.2021
- Effiziente Elektrische Motorsysteme, Webinar für Spezialisten, 04.05.2021
- SC22G WG18 Session 11, 06.05.2021
- WG28 - Virtual Meeting - Morning Session, 17.05.2021
- WG28 - Virtual Meeting - Afternoon Session, 17.05.2021
- WG31 on May 18, 2021 - Morning Session, 18.05.2021
- WG31 on May 18, 2021 - Afternoon Session, 18.05.2021
- IEC/TC 2 Virtual Plenary Meeting, 19.05.2021
- TC2 / WG12 Paris, 21.05.2021
- SC22G WG18 Session 12, 07.06.2021
- Revision of IEC 61800-9-2 - Energy efficiency classes for VSDs, 04.08.2021
- CAISEMS 6th meeting - by Zoom, 17.09.2021
- WG28 - Alignment on drafted CDs for IEC60034-2-x- family, 06.10.2021
- IEC TC 22 virtual plenary meeting, 07.10.2021
- Revision of IEC 61800-9-2 - Energy efficiency classes for VSDs follow up, 10.11.2021.
- EMSA Meeting - Zoom Meeting, 15.11.2021.
- WG12 Web Meeting, 24.11.2021
- WG31 online Meeting, 26.11.2021
- CENELEC Meeting 2021 / online, 13.12.2021
- CENELEC TC22X (12.12.2021) -> MS Teams
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (18.01.2022 ff) -> 6 MS Teams Meetings
- EMSA Meeting (02.05.2022)



Meetings nach Aufhebung der Covid-Reisebeschränkungen

- IEC TC 2 WG 28 (18.05.2022), London
- IEC TC 2 WG31(19.05.2022) , London
- IEC TC 2 WG 12 (20.05.2022) , London
- CENELEC Meeting (12.12.2022), Wien
- IEC TC 2 WG 28 (20.02.2023), Milano, Italy
- IEC TC 2 WG31 (21.02.2023), Milano, Italy
- IEC TC 2 WG 12 (22.02.2023), Milano, Italy
- ACEE Meeting Frühjahr, (05. - 06. 04. 2023) Seoul, South Korea
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (12. - 14.04.2023), Erlangen, Germany (remote Teilnahme)
- EMSA Meeting Frühjahr 2023 (15. - 16. 05. 2023) Toulouse, France
- IEC TC 2 WG31 (03.10.2023), Paris, France
- IEC TC 2 General Assembly (05.10.2023), Paris, France
- IEC TC 2 WG 12 (06.10.2023), Paris, France
- ACEE Meeting Herbst (10. – 11.10.2023), Grenoble, France
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (20.10.2023), nur online
- EMSA Meeting Herbst 2023 (17.11.2023), Wellington New Zealand
- EMSA Outreach Webinar SiC Inverter (18.11.2023), Wellington New Zealand
- EMSA Outreach Webinar Digitalisierung für effiziente elektrische Motorsysteme (05.12.2023), online (organisiert durch Konstantin Kulterer, Energy Agency Austria)
- CENELEC TC22X (12. – 13.12.2023), Milano, Italy
- IEC TC 2 WG 12 (11.04.2024), Zoom
- EMSA Meeting Frühjahr 2024 (16. 04. 2024) Zoom
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (12. - 14.06.2024), Nice, France
- IEC TC 2 WG12 (07.06.2024), Zoom
- IEC TC 2 WG31 (28.06.2024), Zoom
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (11. 07. 2024), Zoom
- EMSA Meeting Herbst 2024 (02. 09. 2024), Luzern, Switzerland
- ACEE Meeting Herbst, (16. - 17. 10. 2024) London, United Kingdom
- IEC TC 22 SC22 WG 18 (11. – 12. 11. 2024), Shanghai, China
- IEC TC 22 General Meeting (16.11.2024), Shanghai, China
- CENELEC TC22X (11. – 112.11.2024), Paris, France
- IEC TC 2 WG12 (29.11.2024), Zoom
- IEC TC 2 WG31 (29.11.2024), Zoom



6 Kommunikation

An folgenden Events wurden die Aktivitäten «International Standards & Testing» im Rahmen von Vorträgen oder Teilnahme an Podiumsdiskussionen vorgestellt:

- Teilnahme am MOTOR SUMMIT 2020, online am 18./19 November 2020 (Moderator des 2. Tages)
- Teilnahme als Redner beim Webinar “Effiziente Elektrische Motorsysteme», organized by K. Kulterer (04.05.2021)
- Teilnahme als Redner “Motorworkshop Top Motors” (29.06.2021)
- Moderation des MOTOR SUMMIT Switzerland 2021, online am 3. November 2021
- Teilnahme am SAARC Seminar « VFD and motor system saving potentials» mit dem Beitrag «Complete drive Systems – motors & VFD » am 6.Dez. 2021
- Nationales IEC-Meeting bei electrosuisse, Fehraltdorf am 1. Dezember 2021 (Vortrag)
- Teilnahme am SAARC Seminar « VFD and motor system saving potentials» mit dem Beitrag «Complete drive Systems – motors & VFD » am 6.Dez. 2021
- Teilnahme als Redner EEMODS'2022 Stuttgart, Presentation (03.05.2022)
- BFE Trendwatching Group Meeting (07. 06. 2023), Baden, Switzerland (Vortrag)
- INCITE Forum, BFE Energie Schweiz (28.11.2023), Bern, Switzerland (Tagungsmoderation)
- EMSA Outreach Webinar SiC Inverter (18.11.2023), Wellington New Zealand
- EMSA Outreach Webinar Digitalisierung für effiziente elektrische Motorsysteme (05.12.2023), online (organisiert durch Konstantin Kulterer, Energy Agency Austria)
- VDE OVE Tagung Elektromechanische Antriebssysteme; 8. - 9. November 2023 Wien (Programmkomitee und Tagungsteilnahme)
- eemods'24, als Teil eines dreiköpfigen lokalen Organisationsteam wurde die eemods'24 vom 3. Bis 5. September 2024 erfolgreich in der Schweiz (Luzern) durchgeführt.
- International Copper Association #MotosAcademy: Webinar zum Thema “Advancing Industrial Inverters: the research roadmap for Wide Bandgap Semiconductors”; 21. 11. 2024, online



7 Publikationen

1. "Round Robin Converters (RR'C) Results and Conclusions"; Andrea Vezzini, Sandie B. Nielsen, EEMODS'22 Conference, Stuttgart
2. "Round Robin of Converter Losses, Final Report"; EMSA Website; 11. Dezember 2022
3. "Policy Brief – Round Robin for Variable Speed Drives"; EMSA Website; 26. Juli 2023
4. "Implementation of electrical machine ageing testing", Lucien Porta, Andrea Vezzini, Berner Fachhochschule 14. Dezember 2022 (Master-Projektarbeit)



8 Literaturverzeichnis

1. IEC 61800-9-2 Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications - Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters
2. RR'C Phase 2 V6_20190911.pdf: Guide to Round Robin Converter Losses (RR'C): Phase 2
3. RR'C-Phase 2 Requirements-Labs.pdf: Round Robin Converter Phase 2: Requirements, Duties and Obligations of participating laboratories
4. UTP 2.0 - 20190601.pdf: Converter loss measurement utilizing a merge of the existing testing procedure in IEC 61800-9-2 and the experience gained from RR'C Phase 1, UTP 1.0
5. UTP 2.0 - Supplemental paper 20191003.pdf: RR'C2, UTP 2.0 – Updated order of points
6. Weijun Yin. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors. IEEE Electrical Insulation Magazine, 13(6):18–23, 1997
7. Peng Wang, Andrea Cavallini, and Gian Carlo Montanari. The effects of square wave voltage rise time on pd statistics in time and frequency domain. In 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pages 262–265, 2015
8. Kohei Shirabe, Mahesh Swamy, Jun-Koo Kang, Masaki Hisatsune, Yifeng Wu, Don Kebort, and Jim Honea. Advantages of high frequency PWM in AC motor drive applications. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pages 2977–2984, 2012
9. Lucien Porta, Andrea Vezzini. Implementation of electrical machine ageing testing. Berner Fachhochschule, 14. Dezember 2022
10. Shan Yin, King Jet Tseng, Rejeki Simanjorang, Yong Liu, and Josep Pou. A 50-kW High-Frequency and High-Efficiency SiC Voltage Source Inverter for More Electric Aircraft. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 64(11), 2017
11. R. J. Kerkman, D. Leggate, D. Schlegel and G. Skibinski, "PWM inverters and their influence on motor overvoltage," Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference, Atlanta, GA, USA, 1997, pp. 103-113 vol.1, doi: 10.1109/APEC.1997.581440.
12. S. Sundeep, J. Wang, A. Griffio and F. Alvarez-Gonzalez, "Antiresonance Phenomenon and Peak Voltage Stress Within PWM Inverter Fed Stator Winding," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 12, pp. 11826-11836, Dec. 2021
13. D. Hewitt, S. Sundeep, J. Wang, A. Griffio, M. Diab and X. Yuan, "An Experimental Assessment of the Impact of High dv/dt SiC Converters on Insulation Lifetime of Electrical Machines," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8
14. P. Wang, A. Cavallini and G. C. Montanari, "The influence of repetitive square wave voltage parameters on enameled wire endurance," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 3, pp. 1276-1284, June 2014
15. R. J. Kerkman, D. Leggate, D. Schlegel and G. Skibinski, "PWM inverters and their influence on motor overvoltage," Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference, Atlanta, GA, USA, 1997, pp. 103-113 vol.1
16. H. Tischmacher, „Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichterge-speisten Elektromotoren“, DoctoralThesis, Hannover : Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Han-nover, 2017
17. K. B. Tawfiq, M. Güleç, und P. Sergeant, „Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Ma-chines: A Comprehensive Research Review“, Machines, Bd. 11, Nr. 5, Art. Nr. 5, Mai 2023



18. M. Weicker, „Gleichakteffekte bei umrichtergespeisten Elektromotoren“, Ph.D. Thesis, Technische Universität, Darmstadt, 2021. doi: 10.26083/tuprints-00019145
19. A. von Jouanne et al., "Motor Bearing Current Characterization in SiC- based Variable Frequency Drive Applications," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 2718-2725
20. R. Collin, A. Yokochi and A. v. Jouanne, "Novel Characterization of Si- and SiC-based PWM Inverter Bearing Currents Using Probability Density Functions," 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 5146-5153
21. Y. Xu, Y. Liang, X. Yuan, X. Wu and Y. Li, "Experimental Assessment of High Frequency Bearing Currents in an Induction Motor Driven by a SiC Inverter," in IEEE Access, vol. 9, pp. 40540-40549, 2021
22. Puchtler, Steffen, Robert Maier, Martin Kuhn, and Yves Burkhardt. 2024. "The Influence of Load and Speed on the Initial Breakdown of Rolling Bearings Exposed to Electrical Currents" Lubricants 12, no. 1: 1.



9 Anhang

1. Lucien Porta, Andrea Vezzini: Implementation of electrical machine ageing testing, Berner Fachhochschule, 14. Dezember 2022
2. Andrea Vezzini, Sandie B. Nielsen: " Report on Round Robin of Converter Losses Final Report of Results" November 2022